

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยกระแสดับภายใต้สภาวะเปื้อน  
ตามสภาพมลภาวะของประเทศไทย เปรียบเทียบกับการจำลอง  
ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

ELECTRICAL PERFORMANCES OF AC INSULATORS UNDER  
POLLUTED CONDITIONS IN THAILAND COMPARED  
WITH IEC 507 STANDARD

อภิสิทธิ์ ไชยแสงสุขกุล  
APISIT CHAISAEINGSUKKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-020-103

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยกระแสดับภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน  
ตามสภาพมลภาวะของประเทศไทย เปรียบเทียบกับการจำลอง  
ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

ELECTRICAL PERFORMANCES OF AC INSULATORS UNDER  
POLLUTED CONDITIONS IN THAILAND COMPARED  
WITH IEC 507 STANDARD

อภิสิทธิ์ ไชยแสงสุขกุล

APISIT CHAISAENG SUKKUL

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี...1.2...ก.พ...2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-020-103

**ELECTRICAL PERFORMANCES OF AC INSULATORS UNDER  
POLLUTED CONDITIONS IN THAILAND COMPARED  
WITH IEC 507 STANDARD**

**APISIT CHAISAENGSUKKUL**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMITL-2007-EN-M-020-103**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยกระแสสลับภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนตามสภาพมลภาวะของประเทศไทย เปรียบเทียบกับผลการจำลองตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507
นักศึกษา	นายอภิสิทธิ์ ไชยแสงสุขกุล
รหัสประจำตัว	47060214
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการทดสอบลูกถ้วยสองชนิดคือ ลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน คือ การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test ) โดยใช้สารละลายเกลือจากชายฝั่งทะเลตะวันออก และสารละลายเกลือตามความเข้มข้นของเกลือที่กำหนดในมาตรฐาน และการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) โดยใช้ฝุ่นผงที่เกิดจากมลภาวะในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ฝุ่นแป้งข้าวโพด ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และกาอลิน ( Kaolin ) ซึ่งเป็นฝุ่นกำหนดในมาตรฐาน ผลการทดสอบ พบว่าในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ เมื่อความเข้มข้นของไอเกลือเพิ่มสูงขึ้น แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลน ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์มีแนวโน้มลดลง ส่วนกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนสูงกว่าลูกถ้วยโพลีเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือจากน้ำทะเล ส่วนการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะฝุ่นผงนั้น ผลการทดสอบพบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อระดับสิ่งเปรอะเปื้อนเพิ่มขึ้น โดยแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของ ลูกถ้วยพอร์ซเลนภายใต้สภาวะฝุ่นแป้งข้าวโพดและฝุ่นซิเมนต์ สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้สภาวะฝุ่นอาหารสัตว์และฝุ่นกาอลิน แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อระดับสิ่งเปรอะเปื้อนของฝุ่นแป้งข้าวโพด ฝุ่นซิเมนต์ เพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับสิ่งเปรอะเปื้อนของฝุ่นอาหารสัตว์และฝุ่นกาอลินเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อระดับสิ่งเปรอะเปื้อนเพิ่มขึ้นยกเว้นฝุ่นอาหารสัตว์

<b>Thesis Title</b>	Electrical Performances of AC Insulators under Polluted Conditions in Thailand Compared with IEC 507 Standard
<b>Student</b>	Mr. Apisit Chaisaengsukkul
<b>Student ID.</b>	47060214
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

## **ABSTRACT**

This thesis presents the study results of electrical performance testing of porcelain and polymeric insulators under polluted conditions based on IEC 507 standard. This standard recommends two test methods : Salt Fog Test and Solid layer Test. Salt Fog Test is carried out using sea water from the eastern coast of Thailand and saline solutions are prepared according to the standard, while Solid Layer Test is carried out using polluted dusts collected from factories such as flour dust, cement dusts , animal feed dusts and Kaolin as recommended in the standard. The results of Salt Fog Test show that when the salinity levels of saline solutions are increased, the corona inception voltages of porcelain insulators are relatively constant, while the corona inception voltage of polymeric insulators are decreased. Leakage current of porcelain insulators and polymeric insulators are relatively constant with the increase of salinity levels. The corona inception voltages of porcelain insulators when exposing to sea water are higher than those of polymeric insulators. For Solid Layer Test, the results show that corona inception voltage of porcelain insulators are relatively constant with the increase of polluted-level, the corona inception voltages of porcelain insulators when exposed to flour dust and cement dust are higher than those of porcelain when exposed to animal feed dust and Kaolin. For polymeric insulators, corona inception voltages are relatively constant when polluted levels of flour dust and cement dust are increased, while corona inception voltages are decreased when polluted levels of animal feed and Kaolin are increased. Leakage currents of porcelain insulators and polymeric insulators are relatively constant when levels of various polluted dusts are increased except animal feed dust.

## กิติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานวิจัยนี้ เกิดจากความร่วมมือและสนับสนุนจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องแม้ว่าการดำเนินโครงการจะมีอุปสรรคบางครั้ง มากบ้าง น้อยบ้าง แต่เมื่อคำนึงถึงประโยชน์และคุณค่าของงาน ประจวบกับกำลังใจที่ได้รับเสมอมา ทำให้เกิดแรงบันดาลใจให้สู้ต่อเพื่อความสำเร็จที่รออยู่

ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ที่ได้ให้แนวคิดการทำวิจัย ชี้นแนะ รวมถึงข้อปรับปรุงต่าง ๆ จากประสบการณ์มากมายที่ท่านส่งสมมา

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้ข้อเสนอแนะ แนวทางการทำวิจัย รวมถึงการให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ อย่างไม่คำนึงถึงแก่เหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้มีรายนามข้างล่างนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนจนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

- พี่ประหยัด จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องกล่องโคโรนา ที่ใช้ในการวิจัยตั้งแต่เริ่มต้น รวมถึงเถาเถิน ทำให้งานวิจัยมีคุณค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
- บริษัท คาด้าเอ็นที จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องกล่องโคโรนา ที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งขาดเสียมิได้รวมถึงทีมงานที่คอยให้การประสานงานด้วยดี
- พี่ยุวดี พี่เทอดศักดิ์ ที่ได้อนุเคราะห์ผูุ้่นจากโรงงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่องานวิจัย ทำให้งานวิจัยมีประโยชน์มากขึ้น
- คุณसानิต สมบูรณ์ จากการไฟฟ้าภูมิภาค ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย อย่างต่อเนื่อง รวมถึงสละเวลาอันมีค่าช่วยขนน้ำทะเลเพื่อทดสอบอีกด้วย
- คุณกานต์วิสูตร คำทิพย์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า และเป็นกำลังสำคัญ จนทำให้การทดสอบสำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี แม้จะถึงสว่างหลายวันก็ตาม
- เพื่อน ๆ น้อง ๆ ปริญญาโท ที่ทำโครงการงานวิจัย ไฟฟ้าแรงสูง ทุกคน ทั้งที่จบแล้วและกำลังดำเนินงานวิจัยอยู่ อาทิ คุณภานุพงศ์ พินกฤษ, ณัฐพันธุ์ บุญเสนอ, ประวิทย์ เพชรผึ้ง และคนอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามได้ทั้งหมด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ไม่ว่าจะข้อมูลหรือเรื่องอื่น ๆ และที่สำคัญคือ กำลังใจอย่างเสมอมา
- ผู้เขียนขอขอบคุณ น้อง ๆ ปริญญาตรี ที่เกี่ยวข้อง ทุกคนทุกกลุ่มที่ได้ช่วยกันตั้งแต่เริ่มต้น ประกอบชิ้นงาน ทดสอบ จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกท่าน ทั้งภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์รวมถึงประสานงานและเอกสารอย่างดียิ่ง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 สิ่งเปราะเป็อนบนลูกถ้วย.....	6
2.3 การจำลองการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปราะเป็อน.....	7
2.4 การการทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์.....	8
2.5 การวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยเปราะเป็อน.....	8
2.6 วิธีการแก้ปัญหา.....	8
2.7 การทำความสะอาดลูกถ้วย.....	9
2.8 การออกแบบลูกถ้วยสำหรับใช้ในบริเวณที่มีสิ่งเปราะเป็อน.....	10
2.9 การวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	10
2.10 ระดับความเปราะเป็อนอ้างอิงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 .....	14
2.11 การหาค่าระดับความเปราะเป็อน.....	14

## สารบัญ ( ต่อ )

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างห้องจำลองสภาวะเปราะเพื่อทดสอบ.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 ลูกถ้วยกระแสดลัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	17
3.3 การทดสอบลูกถ้วยไฟฟ้กระแสดลัด ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507.....	18
3.4 ข้อกำหนดและการออกแบบระบบทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเป็นไอเกลือ.....	18
3.5 ข้อกำหนดและการออกแบบระบบทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง.....	22
3.6 ข้อกำหนดและการออกแบบระบบทดสอบด้วยไอน้ำ.....	25
3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	25
3.8 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้ภาวะเปราะเป็น ไอเกลือและค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ.....	27
3.9 การเตรียมฝุ่นผงที่ใช้เคลือบลูกถ้วยเพื่อการทดสอบลูกถ้วยภายใต้ภาวะ เปราะเป็นฝุ่นผง.....	27
3.10 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของฝุ่นผงที่ใช้ในการเคลือบลูกถ้วยเพื่อ การทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเป็น.....	30
3.11 การศึกษาคุณสมบัติของลูกถ้วย โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง.....	33
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 การทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเป็นไอเกลือ โดยใช้ สารละลายเกลือ และน้ำทะเล ( Salt Fog Test ).....	38
4.3 ผลการทดลองภายใต้สภาวะเปราะเป็นไอเกลือ ( Salt Fog Test ) .....	40
4.4 การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง โดยใช้ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นปูนซิเมนต์ และเกาลิน ( Solid Layer Test ) .....	43
4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง โดยใช้ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และเกาลิน ( Solid Layer Test ) .....	44
4.6 การทดสอบลูกถ้วยสะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test ).....	51
4.7 ผลการทดลองของลูกถ้วยสะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test ) .....	52

## สารบัญ ( ต่อ )

4.8	การวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนฝุ่นผง ( Insulation Resistance ) .....	55
4.9	ผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนฝุ่นผง ( Insulation Resistance ) .....	56
4.10	การตรวจลักษณะเปราะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope : SEM ) .....	58
4.11	ผลการตรวจลักษณะเปราะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscopy : SEM ) .....	58
4.12	การทดสอบการป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนฝุ่นผง ( Hydrophobic ) .....	61
4.13	ผลการทดสอบการป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนฝุ่นผง ( Hydrophobic ) .....	62
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	65
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	65
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	68
เอกสารอ้างอิง.....		69
ภาคผนวก ก.....		72
ภาคผนวก ข.....		106
ภาคผนวก ค.....		129
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....		131
ประวัติผู้เขียน.....		158

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าความนำไฟฟ้าที่กำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507.....12
2.2	ค่าแฟคเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ .....13
2.3	ระดับความเปราะเปื้อนอ้างอิงของเกล็ดตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507.....14
3.1	ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนไอเกลือ.....27
3.2	ส่วนผสมของฝุ่นในแต่ละระดับความเปราะเปื้อนที่ใช้ในการเคลือบ ลูกถ้วย.....28
3.3	ค่า ESDD ของฝุ่นชนิดต่าง ๆ ในแต่ละระดับความเปราะเปื้อน ที่ใช้ในการเคลือบลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์.....30
3.4	สัดส่วนสารประกอบของฝุ่นแต่ละชนิดที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบกับ เกล็ดที่กำหนดในมาตรฐาน.....32
4.1	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้ สภาวะเปราะเปื้อนไอเกลือ.....40
4.2	กระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนไอเกลือ.....40
4.3	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้ สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ.....45
4.4	กระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ.....45
4.5	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์สะอาด ภายใต้สภาวะหมอกจำลอง..... 52
4.6	กระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์สะอาดภายใต้ สภาวะหมอกจำลอง.....52
4.7	ค่าความต้านทานฉนวนหน่วย G-Ohm ( Insulation Resistance ) ของลูกถ้วย โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผงที่อุณหภูมิ 30 ° C..... 56
4.8	ค่าความต้านทานฉนวนหน่วย G-Ohm ( Insulation Resistance ) ของลูกถ้วย โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผงที่อุณหภูมิ 50 ° C .....56

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลูกถ้วยแขวนพอร์ชเลน ( ก ) และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ( ข ).....5
2.2	ลูกถ้วยพอร์ชเลนชนิดต่าง ๆ.....6
2.3	เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย.....11
3.1	ลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน.....17
3.2	กระโจมทดสอบจริงที่ออกแบบตามมาตรฐาน.....20
3.3	เสาที่ติดตั้งหัวฉีดลมและสารละลายเกลือออกแบบตามมาตรฐาน .....20
3.4	หัวฉีดลมและสารละลายเกลือตามมาตรฐาน ( ก ) และหัวฉีดที่ ออกแบบจริง ( ข ).....21
3.5	กระโจมทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงที่ออกแบบ ตามมาตรฐานกระโจมมีขนาด กว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร สูง 4.5 เมตร.....22
3.6	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน ฝุ่นผง .....25
3.7	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน .....26
3.8	ฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการเคลือบลูกถ้วย .....28
3.9	ลูกถ้วยหลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ.....29
3.10	เครื่องตรวจหาสารประกอบของฝุ่นผง เอ็กซ์ อาร์ เอฟ.....31
3.11	ตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์หลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา ความต้านทานฉนวน ( Insulation resistance ) .....34
3.12	เครื่องวัดค่าความต้านทานฉนวน METREL.....34
3.13	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope ) .....35
3.14	ตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์หลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวน ( Hydrophobic ) .....36
4.1	วงจรทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน ไอเกลือ.....39
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ชเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน ไอเกลือ.....41
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วย พอร์ชเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน ไอเกลือ.....41

## สารบัญรูป ( ต่อ )

4.4	วงจรทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง.....	44
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นชนิดต่าง ๆ.....	46
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นชนิดต่าง ๆ.....	46
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นแป้ง.....	47
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นอาหารสัตว์.....	47
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นปูน.....	48
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นเเกลลิน.....	48
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นชนิดต่าง ๆ .....	49
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วย โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นชนิดต่าง ๆ .....	49
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะหมอกจำลอง.....	52
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วย พอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะหมอกจำลอง.....	53
4.15	ลักษณะการเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ สภาวะเปราะเป็นไอเกลือและฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ.....	55
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวน ( G-Ohm ) และจำนวนวันที่ทำการทดลองของตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปราะเป็นอื่นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 °C .....	57
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวน ( G-Ohm ) และจำนวน วันที่ทำการทดลองของตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเป็นอื่นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C .....	57

## สารบัญรูป ( ต่อ )

- 4.18 ผลการตรวจลักษณะสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้  
สภาวะเปราะเปื้อนต่าง ๆ วันแรกของการทดลอง กำลังขยาย 500 เท่า .....59
- 4.19 ผลการตรวจลักษณะสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์  
ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนต่าง ๆ วันที่ 15 ของการทดลอง เปรียบเทียบ  
ที่อุณหภูมิ 30 °C และ 50 ° C ตามลำดับ กำลังขยาย 500 เท่า..... 60
- 4.20 ผลการตรวจคุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้  
สภาวะสิ่งเปราะเปื้อนต่าง ๆ เปรียบเทียบ ระหว่างวันแรกและวันที่ 15  
ของการทดลองค่าในวงเล็บเป็นการเปรียบเทียบกับค่าการแบ่งระดับ  
การเป็นหยดน้ำ ( Hydrophobic ) ตามมาตรฐาน STRI ประเทศสวีเดน  
สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก ท้ายเล่ม .....64

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ทำให้จำนวนสถานประกอบการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานประกอบการที่ก่อให้เกิดฝุ่นระหว่างที่มีการผลิต เช่น โรงงานผลิตอาหารสัตว์ โรงงานแปรง โรงปูนซีเมนต์ เป็นต้น แม้จะมีกฎหมายหรือมาตรการควบคุมด้านสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตาม มลภาวะทางอากาศสามารถควบคุมได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการติดตั้งในบริเวณสถานประกอบการดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งลูกถ้วย ซึ่งเป็นฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมถึงสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ย่อมต้องเจอฝุ่นหรือสภาพแวดล้อมดังกล่าวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และอาจเป็นสาเหตุทำให้ความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้างดงกล่าวลดลง โดยเฉพาะกรณีที่เกิด ความชื้น หรือ หมอก ส่งผลให้การจ่ายไฟฟ้าขัดข้องทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาถึงปัญหาการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในสภาวะเปรอะเปื้อนดังกล่าวเพื่อให้ทราบถึงที่มาของปัญหา ซึ่งแนวทางหนึ่งสามารถทำได้โดยการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนที่จำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบลูกถ้วยในสภาวะเปรอะเปื้อนเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าในปัจจุบัน เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ( IEC 507 ) [ 11 ] [ 12 ] [ 13 ] [ 14 ] ซึ่งได้กำหนดการทดสอบเป็นสองส่วน คือ การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Layer Test ) ซึ่งเป็นการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงบริเวณที่ใกล้ทะเลหรือมีไอเกลือ โดยใช้สารละลายเกลือตามความเข้มข้นของเกลือที่กำหนด และการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) เป็นการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในบริเวณที่มีมลภาวะฝุ่นผง โดยใช้ฝุ่นดินขาว หรือ เกาลิน ( Kaolin ) เป็นสิ่งเปรอะเปื้อนที่จำลองขึ้นเพื่อเคลือบผิวลูกถ้วย แต่การจำลองด้วยสารละลายเกลือ และการเคลือบด้วยฝุ่นดินขาวนั้นเป็นการจำลองสภาวะเปรอะเปื้อนตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ซึ่งยังไม่ได้มีการวิจัยว่ามีความสอดคล้องกับสภาวะเปรอะเปื้อนที่เกิดขึ้นในประเทศไทยหรือไม่ กล่าวคือ ไอเกลือที่พ่นความเข้มข้นเป็นสารละลายระหว่างน้ำกับเกลือที่มีความเข้มข้นตามที่กำหนดของมาตรฐาน แต่ไอเกลือที่เกิดขึ้นจากชายฝั่งทะเลโดยเฉพาะทางภาคตะวันออกที่มีการติดตั้งลูกถ้วยสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงนั้น อาจมีส่วนประกอบที่แตกต่าง เช่น ฝุ่นผง สารแขวนลอย เป็นต้น นอกจากนี้ ฝุ่นดินขาวที่ใช้ในการทดสอบอาจ

แตกต่างจากฝุ่นที่เกิดขึ้นในเขตนิกมอุตสาหกรรมที่มีโรงงานหลายแห่ง ที่ปล่อยมลภาวะออกมา เช่น ฝุ่นปูน ฝุ่นจากธัญพืช เป็นต้น พฤติกรรมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยประอะเป็อนที่ได้จากการจำลองสิ่งประอะเป็อนตามมาตรฐานอาจจะไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยประอะเป็อนจริง ๆ ตามธรรมชาติก็ได้ ดังนั้น การวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับการใช้ลูกถ้วยในสภาวะประอะเป็อน ดังกล่าว จำเป็นต้องจำลองภาวะแวดล้อมใกล้เคียงการใช้งานจริง ซึ่งจะทำให้ผลวิเคราะห์ถูกต้องชัดเจนยิ่งขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประอะเป็อนตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประอะเป็อนที่มีการจำลองสอดคล้องตามมลภาวะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ผลที่ได้จากการทดสอบจะช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจเลือกลูกถ้วยที่เหมาะสมกับสภาพมลภาวะที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในประเทศไทยได้
3. เพื่อศึกษาการออกแบบและทำการสร้างกระโจมการทดสอบลูกถ้วยฉนวนตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ( IEC 507 ) นั้น ซึ่งชุดทดสอบดังกล่าว นอกจากจะใช้ในการทดสอบลูกถ้วยตามมาตรฐานแล้ว ยังสามารถใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น เครื่องเอทพีวีส์แรงสูงกับดักฟ้าผ่า ฯลฯ ภายใต้สภาวะประอะเป็อนได้ ซึ่งจะเป็อนแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุกรณีลูกถ้วยหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดความเสียหายได้ ทำให้มีการศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะดังกล่าว ได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะประอะเป็อน โดยเน้นการจำลองภาวะตามมลภาวะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย จึงได้มีการกำหนดสมมติฐาน ไว้ดังนี้

1. การทดสอบภายใต้สภาวะประอะเป็อนไอเกลือ ( Salt Fog Layer Test ) จะเป็นการทดสอบลูกถ้วย โดยพ่นละอองเกลือ จากน้ำทะเลแทนสารละลายน้ำและเกลือตามความเข้มข้นที่กำหนดตามมาตรฐาน ซึ่งในการทดสอบดังกล่าว เป็นการจำลองภาวะการใช้งานของลูกถ้วยบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดยเฉพาะทางภาคตะวันออก ซึ่งมักจะ พบปัญหาเกี่ยวกับไอเกลือ

2. การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) จะเป็นการทดสอบลูกถ้วยโดยใช้ฝุ่นผงปูนและฝุ่นผงธัญพืช แทน การใช้ฝุ่นผงดินขาว ( Kaolin ) เคลือบลูกถ้วย ในการทดสอบนี้ เป็นการจำลองการใช้งานของลูกถ้วยในบริเวณที่มีมลภาวะจากแหล่งชุมชนหรือนิคมอุตสาหกรรม ที่มีโรงงานตั้งอยู่เป็นจำนวนมาก

3. เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบได้ จำเป็นต้องเพิ่มการทดสอบลูกถ้วยฉนวนภายใต้สภาวะเกิดหมอกจำลอง ( Clean Fog Test ) การทดสอบทำได้โดยพ่นไอน้ำให้กับลูกถ้วย สะอาดเป็นการจำลองการใช้งานของลูกถ้วยในภาวะที่มีหมอกในตอนเช้า เป็นต้น

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การทดสอบลูกถ้วยในสภาวะเปรอะเปื้อนเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการทดสอบโดยอิงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ( IEC 507 -1991 ) ซึ่งได้กำหนดการทดสอบเป็นสองส่วน คือ การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Layer Test ) โดยการพ่นละอองเกลือด้วยสารละลายเกลือตามความเข้มข้นของเกลือที่กำหนด และการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) โดยการ พ่นไอน้ำในขณะที่ลูกถ้วยทดสอบเคลือบด้วยฝุ่นผง ซึ่งใช้ฝุ่นดินขาว หรือ เกาลิน ( Kaolin )

นอกจากนี้ เพื่อศึกษาลูกถ้วยเชิงเปรียบเทียบจึงได้กำหนดการทดสอบลูกถ้วยฉนวนภายใต้สภาวะเกิดหมอกจำลอง ( Clean Fog Test )

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ ได้กำหนดขอบเขตไว้ดังนี้

1. ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลนและ โพลีเมอร์ตามมลภาวะในประเทศไทย
2. ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลนและ โพลีเมอร์ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507
3. ทำการทดลองเปรียบเทียบการทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลน ตามมลภาวะในประเทศไทย และมาตรฐาน ไอ อี ซี 507
4. ทำการทดลองเปรียบเทียบการทดสอบลูกถ้วยโพลีเมอร์ ตามมลภาวะในประเทศไทย และมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนการศึกษางานวิจัย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีดังนี้

1. ศึกษาข้อกำหนดต่าง ๆ ตามมาตรฐาน รวมถึงกระบวนการทดสอบที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบ ทดสอบ ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ เช่น หัวฉีด ( Fog Nozzle ) เป็นต้น
3. ออกแบบ ประกอบ ปรับตั้ง กระจกทดสอบสำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test )
4. ออกแบบ ประกอบ ปรับตั้ง กระจกทดสอบอุปกรณ์สำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test )
5. ดำเนินการทดสอบพร้อมบันทึกผล
6. สรุปและวิเคราะห์ผล

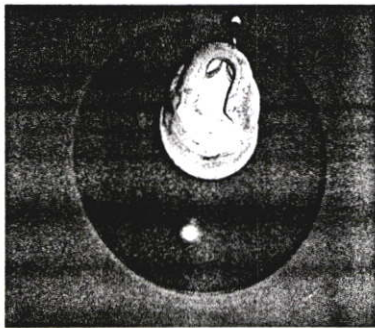
## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎี

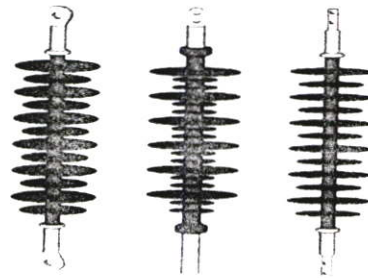
### 2.1 บทนำ

ลูกถ้วยเป็นฉนวนที่นำมาใช้ในการติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะในส่วนของระบบผลิต ระบบส่งและจ่ายกระแสไฟฟ้า เป็นเวลานานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ลูกถ้วยนอกจากทำหน้าที่เป็นฉนวนในทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องสามารถรับแรงทางกล ทนต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ได้ด้วย ลูกถ้วยที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งมีการออกแบบตามลักษณะและความเหมาะสมของการใช้งาน เช่น ลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยคอดัน ลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยมีหลายประเภท ได้แก่ พอร์ซเลน แก้วเหนียว โพลีเมอร์ การติดตั้งลูกถ้วยใช้งานปกติจะติดตั้งใช้งานกลางแจ้ง ( Outdoor ) ซึ่งมีโอกาสสัมผัสกับฝุ่นละออง ไอเกลือ น้ำฝน ไอรกจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ยังต้องรองรับสภาวะการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิแต่ละวัน และอุณหภูมิตามฤดูกาลตลอดปี

ลูกถ้วยที่ออกแบบมีทั้งที่สามารถใช้งานกระแสสลับและกระแสตรง การออกแบบลูกถ้วยจะต้องคำนึงถึงเส้นตักขั้วสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งควรมีค่าต่ำสุด นอกจากนี้ ลูกถ้วยจะต้องทนต่อการเกิดแรงคั้นวาบไฟตามผิว แรงคั้นเจาะทะลุ ซึ่งแรงคั้นดังกล่าวจะต้องสูงกว่าแรงคั้นใช้งาน

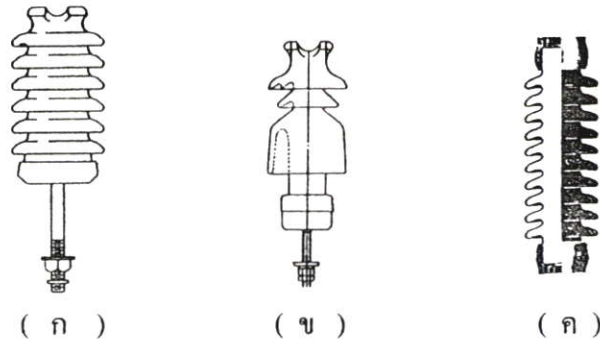


( ก )



( ข )

รูปที่ 2.1 ลูกถ้วยพอร์ซเลน ( ก ) และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ( ข )



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างลูกถ้วยพอร์ซเลนชนิดต่าง ๆ ( ก ) ลูกถ้วยก้านตรง  
( ข ) ลูกถ้วยก้านตรงหลัก ( ค ) ลูกถ้วยหลัก

## 2.2 สิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วย [ 18 ]

ชนิดของสิ่งเปราะเปื้อน แตกต่างกันตามพื้นที่ที่ลูกถ้วยมีการติดตั้งใช้งาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่ที่พบได้แก่ซิลิกอนไดออกไซด์ (  $\text{SiO}_2$  ) ส่วน โซเดียมคลอไรด์ (  $\text{NaCl}$  ) มักจะพบในบริเวณที่มีการติดตั้งตามชายฝั่งทะเล [ 18 ] ในพื้นที่ที่ทำการเกษตร มักจะพบสารประกอบฟอสเฟสและไนเตรทของแอมโมเนียและไนโตรเจน

ลูกถ้วยที่ใช้งานมักจะถูกเปียกน้ำจากฝน หยดน้ำค้างหรือหมอกที่เกิดจากการกระบวนการกลั่นตัวเนื่องจากความแตกต่างอุณหภูมิของลูกถ้วยและอุณหภูมิแวดล้อม ลักษณะการเปียกน้ำ การเกิดหยดน้ำบนผิวลูกถ้วยจะแตกต่างกันตามชนิดของลูกถ้วยที่ใช้งาน เช่น ลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ลูกถ้วยโพลีเมอร์มีคุณสมบัติในการต้านการเกิดน้ำหรือการเป็นหยดน้ำบนผิวนวนลูกถ้วย ( Hydrophobicity ) ได้ดีกว่าลูกถ้วยพอร์ซเลน

สิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เมื่อมีการเปียกน้ำนั้นจะมีผลทำให้ความต้านทานผิวนวนลดลง สำหรับสิ่งเปราะเปื้อนที่เป็นเกลือนั้น เกลือโซเดียมคลอไรด์ (  $\text{NaCl}$  ) จะละลายน้ำได้ดีที่สุดและมีโอกาสทำให้เกิดกระแสรั่วไหล ( Leakage current ) ได้สูงที่สุด

ความเป็นผิวนวนลูกถ้วยจะลดลงเนื่องจาก ลูกถ้วยมีการเปราะเปื้อนและเปียกน้ำซึ่งลักษณะดังกล่าว จะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลที่ตามมาคือ จะทำให้กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไป สิ่งเปราะเปื้อนจำแนกเป็น 2 ชนิด คือ สิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ ( Soluble ) และสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ( Nonsoluble ) ซึ่งสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้จะมีผลต่อการใช้งานของผิวนวนลูกถ้วย มากกว่าสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำไม่ได้ การแบ่งระดับความเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้นั้นจะพิจารณาจาก ค่า ESDD ( Equivalent Salt Deposit Density ) ซึ่งจะ

พิจารณาจากปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าเมื่อมีการละลายน้ำต่อพื้นที่ผิวของฉนวนลูกถ้วย วิธีการหาค่า EDSS ได้มีการกำหนดเป็นมาตรฐานสากล เช่น มาตรฐาน IEC , ANSI เป็นต้น โดยทั่วไป ESDD มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( mg / cm<sup>2</sup> ) สำหรับสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำไม่ได้จะวัดโดยค่า NSDD ( Nonsoluble Deposite Density ) ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( mg / cm<sup>2</sup> ) เช่นกัน ในปัจจุบัน ยังมีไม่มีมาตรฐาน ใดกำหนดระดับสิ่งเปรอะเปื้อน ประเภทที่ไม่ละลายน้ำ

### 2.3 การจำลองการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน

การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนจำลองตามมาตรฐาน เช่น IEC หรือ IEEE/ ANSI มีมากกว่า 50 ปี โดยเป็นการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test ) และการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test ) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบภายใต้กระโจมปิด ( Enclosed chamber )

การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test ) นั้น ได้มีการพัฒนาและดำเนินการทดสอบโดยความร่วมมือของประเทศ อังกฤษ ฝรั่งเศสและอิตาลี เนื่องจากมีสายส่งแรงสูงติดตั้งในบริเวณชายฝั่งทะเลเป็นจำนวนมาก ในการทดสอบนี้ จะใช้ลูกถ้วยสะอาดและพ่นด้วยสารละลายเกลือด้วยระยะห่างที่กำหนด ขณะเดียวกันจะป้อนแรงดันทดสอบคงที่ตามแรงดันที่ใช้งานจริง ระดับของความเปรอะเปื้อนจะพิจารณาจากปริมาณของเกลือที่มีในสารละลาย ผลการทดสอบจะพิจารณาจากการเกิดแฟลชโอเวอร์ ( Flashover ) หรือการทนต่อแรงดันทดสอบ ( Withstand test ) การป้อนแรงดันทดสอบจะใช้เวลานานประมาณ 1 ชั่วโมง

การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test ) การทดสอบดังกล่าวได้มีการพัฒนาในทวีปอเมริกาเมื่อ ในปี ค.ศ. 1960 โดยคณะกรรมการของ IEEE ที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยเปรอะเปื้อน สืบเนื่องจากการติดตั้งลูกถ้วยใช้งานที่ห่างจากชายฝั่งทะเลและลูกถ้วยเกิดสิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะในขณะที่แห้งและขณะที่เจือหยดน้ำค้าง ภาวะหมอก หรือฝน ในการทดสอบชนิดนี้ จะทำการเตรียมลูกถ้วยให้มีการเปรอะเปื้อนด้วยเกลือดินเหนียวเกาหลีหรือโดโนโกะ ( Kaolin or tonoko ) ในน้ำ ซึ่งปริมาณเกลือที่มีอยู่จะกำหนดระดับของสิ่งเปรอะเปื้อน จากนั้นนำลูกถ้วยไปแขวนและป้อนแรงดันปกติที่ใช้งาน จากนั้นจ่ายไอน้ำเพื่อให้ลูกถ้วยมีสภาพเปียกชื้น ผลการทดสอบจะพิจารณาจากการเกิดแฟลชโอเวอร์ ( Flashover ) หรือการทนต่อแรงดันทดสอบ ( Withstand test ) การป้อนแรงดันทดสอบจะใช้เวลานานประมาณ 2 ชั่วโมง

## 2.4 การทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์

ลูกถ้วยพอร์ซเลนมีการใช้งานมากกว่า 100 ปี ในช่วงเวลาดังกล่าว ได้มีการทดสอบและพัฒนาของลูกถ้วยเพื่อให้รองรับภาวะสิ่งเปราะเปื้อน สำหรับคุณสมบัติผิวฉนวนของลูกถ้วยพอร์ซเลนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับฉนวนโพลีเมอร์ซึ่งคุณสมบัติจะเปลี่ยนไปเมื่อเวลาผ่านไป ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนโพลีเมอร์จะต้องเตรียมสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนให้มีความสม่ำเสมอ ควรดำเนินการเร่งอายุฉนวน ( Ageing ) ก่อนการทดสอบเพื่อให้ได้การจำลองการทดสอบที่ใกล้เคียงการใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม การเร่งอายุฉนวนจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและกระบวนการซับซ้อน

## 2.5 การวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยเปราะเปื้อน

ลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งลูกถ้วยแขวนสำหรับระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อมีการป้อนแรงดันให้กับสายส่ง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสนามไฟฟ้าดังกล่าวเป็นสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ กรณีลูกถ้วยที่มีผิวสะอาดและแห้ง ความต้านทานฉนวนมีค่าสูงเมื่อลูกถ้วยดังกล่าวได้รับความชื้น เช่น การเกิดหมอกในตอนเช้า จะทำให้ความต้านทานฉนวนลดลง ซึ่งมีโอกาสเกิดโคโรนาได้ แต่เมื่อความชื้นที่ลูกถ้วยดังกล่าวลดลง การเกิดโคโรนาจะหายไป เช่นตอนกลางวัน เป็นต้น กรณีเกิดสิ่งเปราะเปื้อนขึ้นที่ผิวลูกถ้วย เช่น ไอเกลือ จะทำให้ความต้านทานฉนวนลดลง ทำให้มีโอกาสดังกล่าวได้ ยิ่งถ้าได้รับความชื้นจะทำให้ความต้านทานฉนวนต่ำลงมาก ซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดโคโรนาที่ผิวลูกถ้วยง่ายแล้ว มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวลูกถ้วย ( Flashover ) จากตัวนำผ่านลูกถ้วยและลงดินได้ในที่สุด ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

## 2.6 วิธีการแก้ปัญหา

กรณีลูกถ้วยที่มีการใช้งานและเกิดปัญหาทางไฟฟ้า เช่น การวาวไฟตามผิวอันเนื่องมาจากลูกถ้วยสกปรก มีฝุ่นเกาะ โดยทั่วไปจะดำเนินการโดยฉีดน้ำล้างลูกถ้วย ซึ่งจะต้องมีการวางแผนการล้างทำความสะอาดลูกถ้วยในแผนการบำรุงรักษา เพื่อลดผลกระทบต่อการผลิตของสถานประกอบการ นอกจากนี้ อาจใช้วิธีเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ผิวลูกถ้วย ซึ่งจะช่วยให้โอกาสดังกล่าวลดลง อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวย่อมต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายรวมถึงอายุของการทำงานของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำด้วย นอกจากนี้ ในช่วงที่ผ่านมาหลายประเทศได้มีการนำลูกถ้วยโพลีเมอร์

ติดตั้งใช้งานในบริเวณที่มีมลภาวะ ทั้งนี้ เนื่องจากลูกถ้วยชนิดดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น แรงดันที่เกิดเบรคความสูงกว่าลูกถ้วยพอร์ซเลน น้ำหนักเบากว่า การติดตั้งสะดวกกว่า เป็นต้น สำหรับประเทศไทย ได้มีการนำลูกถ้วยดังกล่าวมาติดตั้งใช้งานบ้างแล้ว เช่น การไฟฟ้าภูมิภาค ส่วนภาคตะวันออก ได้มีการนำลูกถ้วยโพลีเมอร์ 115 kV มาใช้งานบริเวณนิคมอุตสาหกรรมบ่อวิน จังหวัดชลบุรี เป็นต้น อย่างไรก็ตามการติดตั้งลูกถ้วยโพลีเมอร์แทนลูกถ้วยพอร์ซเลนในบริเวณที่มีมลภาวะในประเทศไทยนั้น ยังมิได้แพร่หลายเนื่องจากยังมิได้มีข้อมูลการวิจัยสนับสนุนพอเพียง

## 2.7 การทำความสะอาดลูกถ้วย

สำหรับการทำความสะอาดลูกถ้วยที่มีการใช้งานภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนนั้น สามารถศึกษาได้จากมาตรฐานการทำความสะอาดลูกถ้วยของ IEEE ( Std 957-1995 : Guid for Cleaning Insulators ) การทำความสะอาดลูกถ้วยมีหลายวิธี ได้แก่

การล้างด้วยน้ำ ( Water washing ) การล้างด้วยน้ำ ซึ่งเป็นการทำความสะอาดลูกถ้วยเปรอะเปื้อนได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะสิ่งเปรอะเปื้อนที่เกิดในบริเวณถนนที่มีการสัญจร บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล เป็นต้น หลายปีก่อนการล้างลูกถ้วยด้วยน้ำนั้นเป็นการบำรุงรักษาที่ประหยัด แต่ในปัจจุบันการล้างลูกถ้วยดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูงขึ้นในบางพื้นที่ที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนสูง และจำเป็นต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น อาจใช้วิธีล้างน้ำอัดโน้มติโดยฉีดหัวฉีดน้ำในบริเวณที่มีลูกถ้วยที่ต้องการทำความสะอาด

การทำความสะอาดลูกถ้วยแบบแห้ง ( Dry Cleaning ) เป็นการทำความสะอาดลูกถ้วยโดยหัวฉีดทำความสะอาดโดยใช้วัสดุที่ทำจาก ถั่วอลันท์ ช้างข้าวโพด หรือหินแปง ซึ่งการทำความสะอาดดังกล่าวเหมาะสำหรับสิ่งเปรอะเปื้อนซิเมนต์หรือปูน ข้อดีของการทำความสะอาดโดยวิธีนี้คือสามารถทำความสะอาดได้โดยไม่ต้องดับไฟ อย่างไรก็ตามจะต้องระวังการเกิดการลุกไหม้จากวัสดุดังกล่าว เนื่องจากเป็นวัสดุติดไฟ

การทำความสะอาดด้วยมือ ( Hand Cleaning ) การทำความสะอาดโดยวิธีดังกล่าวเป็นการทำความสะอาดได้ทั่วถึง แต่ต้องใช้แรงงาน วัสดุที่ใช้ทำความสะอาดสามารถเลือกใช้ให้เหมาะกับชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อนได้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับสิ่งเปรอะเปื้อนที่เกาะติดถาวร เช่น ผุ่นคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งสามารถเลือกใช้วัสดุประเภทย่อยสลายทางชีวภาพได้ ( Biodegradable )

การทำความสะอาดโดยใช้น้ำแข็งแห้ง ( Dry Ice Cleaning ) เป็นการทำความสะอาดโดยใช้เทคโนโลยีใหม่ซึ่งจะไม่มีสิ่งตกค้างจากวัสดุที่ใช้ในการทำสะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ใช้เคลือบลูกถ้วยพอร์ซเลน อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่ใช้ในการล้างด้วยวิธีนี้ยังแพงอยู่

## 2.8 การออกแบบลูกถ้วยสำหรับใช้ในบริเวณที่มีสิ่งเประอะเปื้อน

การออกแบบลูกถ้วยพอร์ซเลนสำหรับใช้ในบริเวณที่มีสิ่งเประอะเปื้อนนั้น ได้มีการออกแบบและพัฒนามากกว่า 100 ปีแล้ว การออกแบบจะพิจารณาเรื่องของระยะกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยต่อลูกเพิ่มขึ้น นอกจากจะพิจารณาระยะกระแสรั่วไหลแล้วยังมีพารามิเตอร์อื่นที่ต้องพิจารณา เช่น เส้นผ่าศูนย์กลาง รูปร่าง ระยะห่างของปีกลูกถ้วย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ สำหรับลูกถ้วยที่มีการใช้ในบริเวณที่มีมลภาวะจะใช้วิธีเพิ่มจำนวนลูกถ้วยให้มากขึ้นกว่าบริเวณที่มีการใช้งานทั่วไป วิธีการออกแบบสำหรับลูกถ้วยที่ใช้งานในบริเวณที่มีมลภาวะมีหลายวิธีคือ

การเพิ่มระยะกระแสรั่วไหล ( Extended leakage designs ) วิธีการนี้จะได้ผลดีกับลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยตั้งตรง

การออกแบบทางพลศาสตร์ ( Aerodynamic Designs ) การออกแบบลูกถ้วยโดยวิธีดังกล่าวจะเหมาะสำหรับลูกถ้วยที่มีการใช้งานที่มีมลภาวะ เช่น ทะเลทราย

การขยายขนาดของปีก ( Booster sheds ) การขยายปีกลูกถ้วยเพื่อป้องกันการเกิดแฟลชโอเวอร์ขณะที่มีการทำความสะอาดลูกถ้วย ด้วยน้ำกรณที่มีกรจ่ายไฟ

การเพิ่มจำนวนลูกถ้วย ( Additional insulators ) ในการติดตั้งใช้งานลูกถ้วยหลายแห่ง การเพิ่มจำนวนลูกถ้วยจะช่วยป้องกันการเกิดแฟลชโอเวอร์ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนลูกถ้วยที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยจะต้องพิจารณาในการเพิ่มระยะของการติดตั้งด้วย ( Clearance )

การเคลือบด้วยสารที่เป็นความต้านทาน ( Resistive glaze insulators ) เหมาะสำหรับการใช้งานลูกถ้วยที่มีบริเวณที่มีหมอก เนื่องจากจะทำให้มีการกระจายพลังงานความร้อนทั่วผิวลูกถ้วยทำให้อุณหภูมิลูกถ้วยสูงขึ้นช่วยป้องกันการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะบนลูกถ้วย อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีไอเกลือ การใช้ลูกถ้วยเคลือบด้วยสารที่มีความต้านทานจะไม่เหมาะเนื่องจากจะเกิดการกัดกร่อนสูง

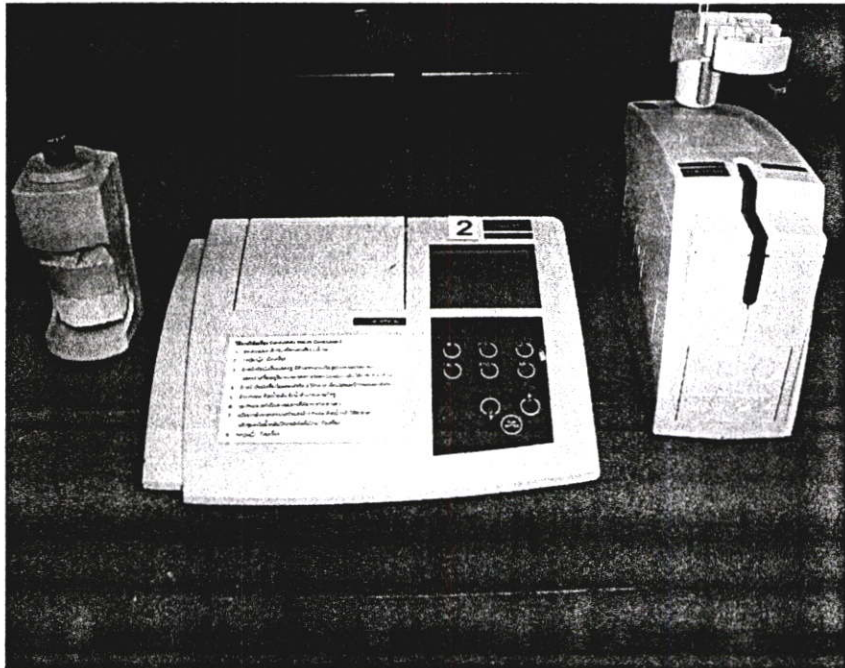
การใช้ลูกถ้วยโพลีเมอร์ ( Nonceramic insulators ) เนื่องจากลูกถ้วยดังกล่าวมีระยะรั่วไหลยาวพื้นที่ผิวน้อยและจากการทดสอบรวมถึงการติดตั้งใช้งานจริง เรื่องการเกิดแฟลชโอเวอร์ พบว่าการใช้ลูกถ้วยโพลีเมอร์ ให้ผลที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม การใช้งานของลูกถ้วยชนิดนี้โดยเฉพาะบริเวณที่มีมลภาวะสูง จะต้องมีการทำความสะอาดเป็นประจำ

## 2.9 การวัดค่าความนำไฟฟ้า

จากมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ซึ่งกล่าวถึงการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเประอะเปื้อนโดยแบ่งเป็นสองส่วน คือ การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเประอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test )

เป็นการจำลองการติดตั้งใช้งานลูกถ้วยในบริเวณที่มีโอกาสสัมผัสไอเกลือ เช่น ใกล้ชายทะเล เป็นต้น และการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) เป็นการจำลองการติดตั้งใช้งานลูกถ้วยในบริเวณที่มีมลภาวะฝุ่นผง เช่น นิคมอุตสาหกรรมซึ่งมีโรงงานจำนวนมาก เป็นต้น

ลูกถ้วยที่ติดตั้งใกล้ชายทะเล มีโอกาสสัมผัสกับไอเกลือสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้ค่าความเป็นฉนวนของลูกถ้วยลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test ) จะต้องทราบความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ ดังกล่าว โดยใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า Inno Level 2 ดังรูป 2.3 ค่าความนำไฟฟ้าเป็นควมบ่งบอกถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลายว่าคิมากน้อยเพียงใด ค่าความนำไฟฟ้าที่สูงแสดงถึงสารละลายนำไฟฟ้าได้ดี ค่านำไฟฟ้าที่ต่ำแสดงถึงสารละลายนำไฟฟ้าได้ไม่ดี โดยทั่วไปค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายมีหน่วยเป็น ซีเมนส์ต่อเมตร ( S / m ) ค่าความนำไฟฟ้าจะแปรตามอุณหภูมิแวดล้อม ในการทดสอบแต่ละครั้งควรมีการบันทึกอุณหภูมิห้องด้วย ค่าความนำไฟฟ้าที่กำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย Inno Level 2

ตารางที่ 2.1 ค่าความนำไฟฟ้าที่กำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

ความเข้มข้นสารละลายเกลือ ( Salinity ) Kg / m <sup>3</sup>	ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ( Volume Conductivity ) ที่ 20 °C ( S / m )
2.5	0.43
3.5	0.60
5	0.83
7	1.15
10	1.6
14	2.2
20	3.0
28	4.1
40	5.6
56	7.6
80	10
112	13
160	17
224	20

ในกรณีที่อุณหภูมิของสารละลายที่วัดค่าความนำต่างจาก 20 °C จะต้องมีการปรับค่าโดยใช้สูตรข้างล่าง

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [ 1 - b( \theta - 20 ) ] \quad ( 2.1 )$$

- โดยที่
- $\sigma_{20}$  คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 20 °C หน่วยเป็น S/m
  - $\sigma_{\theta}$  คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ  $\theta$  °C หน่วยเป็น S/m
  - $\theta$  คืออุณหภูมิสารละลาย หน่วย °C
  - $b$  คือแฟกเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยมีค่าตามตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าแฟกเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

$\theta$ (°C)	b
5	0.03156
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

ตัวอย่างเช่น วัตต์ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ ที่ 25 °C ได้ 2.811 S/m  
ในที่นี้

$\sigma_{20}$  คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 20 °C ที่ต้องการหา

$\sigma_{\theta}$  คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่า 2.811 S/m

$\theta$  คืออุณหภูมิสารละลาย ที่ 25 °C

b คือแฟกเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตาราง 2.2 ดังนี้

ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 - 30 °C ค่าแฟกเตอร์ b ต่างกันเท่ากับ

$$0.02277 - 0.01905 = 0.00372$$

ดังนั้น ที่อุณหภูมิที่ 25 °C จะมีค่าแฟกเตอร์ b เท่ากับ

$$0.02277 - 0.00372 / 2 = 0.0209$$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.1) จะได้

$$\begin{aligned}\sigma_{20} &= \sigma_{\theta} [ 1 - b( \theta - 20 ) ] \\ &= ( 2.811 ) [ 1 - ( 0.0209 ) ( 25 - 20 ) ] \\ &= 2.517 \text{ S/m}\end{aligned}$$

สำหรับการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงนั้น ในการคำนวณหาค่าความเปรอะเปื้อนจะต้องทราบค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเช่นกัน เมื่อนำฝุ่นผงที่จับเกาะที่ผิวลูกถ้วยมาละลายน้ำที่ทราบปริมาณ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อ 2.11

## 2.10 ระดับความเปรอะเปื้อนอ้างอิงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

ในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ได้มีการกำหนดระดับความเปรอะเปื้อนอ้างอิง ( References Degrees of Pollution ) ของลูกถ้วยเมื่อมีการเปรอะเปื้อนด้วยเกาติน รวมถึงค่าความนำเชิงปริมาตรของสารละลายเกาติน ( Volume Conductivity of The Suspension ) ระดับความเปรอะเปื้อนจะพิจารณาจาก ปริมาณสิ่งเปรอะเปื้อน เช่น ผุ่นผง ต่อหน่วยพื้นที่ของลูกถ้วย โดยทั่วไป หน่วยที่นิยมใช้จะเป็น มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (  $\text{mg} / \text{cm}^2$  ) หรือที่เรียกกันว่า SDD ( Salt Deposit Density ) หรือ ESDD ( Equivalent Salt Deposit Density )

ตารางที่ 2.3 ระดับความเปรอะเปื้อนอ้างอิงของเกาตินตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

ระดับความเปรอะเปื้อนอ้างอิงของเกาติน SDD ( $\text{mg} / \text{cm}^2$ )	ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสารละลาย ( Volume Conductivity ), $\sigma_{20}$ ( S/m )
0.025	1
0.035	1.4
0.05	2
0.07	2.8
0.1	4
0.14	5.6
0.2	8
0.28	11.2
0.4	16

ในการกำหนดส่วนประกอบของสิ่งเปรอะเปื้อนสำหรับการทดสอบลูกถ้วย ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนนั้น พิจารณาจากระดับความเปรอะเปื้อนอ้างอิงของเกาตินที่ค่า SDD 0.025, 0.1 และ  $0.4 \text{ mg} / \text{cm}^2$  ตามลำดับ

## 2.11 การหาค่าระดับความเปรอะเปื้อน

ระดับความเปรอะเปื้อนที่จะทำการตรวจวัดหรือวิเคราะห์นั้นสามารถดำเนินการโดย นำลูกถ้วยไปแขวนตามบริเวณที่มีมลภาวะ หรืออาจใช้วิธีการนำผุ่นผงมาละลายน้ำในปริมาณที่กำหนด แล้วฉีดพ่น จุ่ม หรือ เทสารละลายผุ่นไหลผ่านแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง เมื่อได้ลูกถ้วยที่ผิวมีการเปรอะ

เป็อนแล้ว จากนั้น ใช้ฟู่กันชุบน้ำแล้วทำให้หมาดมาปาดฝุ่นทั่วผิวลูกถ้วยแล้วละลายน้ำในปริมาณที่กำหนด นำไปวัดค่าความนำแล้วคำนวณตามสูตรที่กำหนดในมาตรฐาน ซึ่งในการคำนวณดังกล่าว จะต้องทราบพื้นที่ผิวของลูกถ้วยและอุณหภูมิของสารละลายที่มีฝุ่น ค่าที่ได้จะเป็นปริมาณฝุ่นเปราะเป็อนมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่หรือ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( mg / cm<sup>2</sup> )

ตัวอย่างการหาค่าระดับความเปราะเป็อนของลูกถ้วยพอร์ซเลน เมื่อเปราะเป็อนด้วยเกลิน เช่น หลังจากนำเกลินมาละลายน้ำแล้วฉีดพ่นด้วยสารละลายเกลินและใช้ฟู่กันหมาดปาดฝุ่นทั่วลูกถ้วยแล้วนำมาละลายน้ำ ด้วยปริมาตร 300 ลบ. ซม. ( สามารถใช้ปริมาตรน้ำแตกต่างจากนี้ได้ เนื่องจากภาชนะบรรจุสามารถบรรจุน้ำได้สูงสุด 500 ลบ. ซม. จึงกำหนดเพียง 300 ลบ. ซม. ) แล้ววัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายได้เท่ากับ 0.0928 S/m ที่อุณหภูมิ 25 °C จากตารางที่ 2.2 จะได้ค่าแฟคเตอร์ b คือ

ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 - 30 °C ค่าแฟคเตอร์ b ต่างกันเท่ากับ

$$0.02277 - 0.01905 = 0.00372$$

ดังนั้น ที่อุณหภูมิที่ 25 °C จะมีค่าแฟคเตอร์ b เท่ากับ

$$0.02277 - 0.00372 / 2 = 0.0209$$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ ( 2.1 ) จะได้

$$\begin{aligned}\sigma_{20} &= \sigma_{\theta} [ 1 - b( \theta - 20 ) ] \\ &= ( 0.0928 ) [ 1 - ( 0.0209 )( 25 - 20 ) ] \\ &= 0.083 \text{ S/m}\end{aligned}$$

การหาค่า ESDD สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ข้างล่าง

$$ESDD = \frac{SV}{A} \quad ( 2.2 )$$

โดยที่ S = ( 5.7  $\sigma_{20}$  )<sup>1.03</sup> หน่วย กก. / ลบ.ม.

V คือปริมาตรสารละลาย หน่วย ลบ. ซม.

A คือ พื้นที่ผิวลูกถ้วย หน่วยเป็น ตร. ซม.

ในที่นี้

$$S = ( 5.7 \times 0.083 )^{1.03}$$

$$= 0.462 \text{ S/m}$$

เนื่องจากปริมาตรของสารละลายมีค่า 300 ลบ.ซม. และพื้นที่ผิวของลูกถ้วยพอร์ซเลน 1 ลูก มีค่า 1599 ตร. ซม. ( หาได้จากการป้อนข้อมูลของลูกถ้วย เช่น เส้นผ่าศูนย์กลาง รัยะรั้ว ฯลฯ ของลูกถ้วยในโปรแกรม Solid Work ) ดังนั้น ESDD ของลูกถ้วยพอร์ซเลน มีค่า

$$ESDD = \frac{0.462 \times 300}{1599}$$

$$= 0.086 \text{ มก. / ตร. ซม.}$$

สำหรับการหาค่า ESDD ของฝุ่นผงชนิดอื่น ๆ สามารถหาได้ด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น

### บทที่ 3

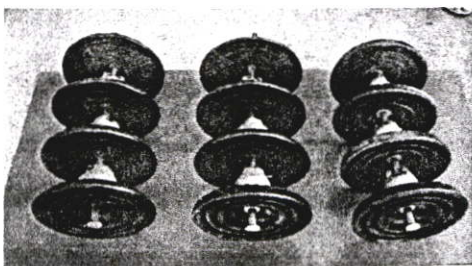
## การออกแบบและสร้างห้องจำลองสภาวะเปรอะเปื้อนเพื่อทดสอบ

### 3.1 บทนำ

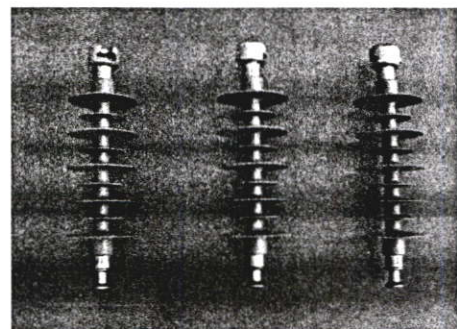
บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบกระโจมทดสอบ หัวฉีดลมและสารละลายเกลือ สำหรับการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test ) และการออกแบบกระโจม เครื่องกำเนิดไอน้ำ ชุดจ่ายไอน้ำ สำหรับการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 รวมถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดสอบและการเตรียมฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการเคลือบลูกถ้วยสำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน ฝุ่นผง

### 3.2 ลูกถ้วยกระแสดับที่ใช้ในการทดสอบ

ลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ประเภท คือ ลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ลูกถ้วยพอร์ซเลนที่ใช้ 3 ชุด ชุดละ 4 ลูก ซึ่งเป็นการจำลองความถี่และการติดตั้งลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดัน 33 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ( กฟภ ) ลูกถ้วยดังกล่าวเป็นชนิด 52-3 และลูกถ้วยโพลีเมอร์สำหรับการใช้งานที่แรงดันไม่เกิน 35 กิโลโวลต์ จำนวน 3 ชุด เป็นชนิดปีกสลับ ซึ่งเป็นการจำลองการติดตั้งลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดัน 33 กิโลโวลต์เช่นกัน



( ก ) ลูกถ้วยพอร์ซเลน



( ข ) ลูกถ้วยโพลีเมอร์

รูปที่ 3.1 ลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน

### 3.3 การทดสอบลูกถ้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 การทดสอบลูกถ้วยตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 แบ่งการทดสอบเป็นสองส่วน การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ โดยใช้สารละลายเกลือตามความเข้มข้นที่กำหนด และการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงโดยใช้เกาลิน ( Kaolin ) การทดสอบลูกถ้วยตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 นั้น เป็นการทดสอบว่าลูกถ้วยดังกล่าว มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานทั้งในบริเวณที่มีความเปรอะเปื้อนไอเกลือและฝุ่นผงหรือไม่

### 3.4 ข้อกำหนดและการออกแบบระบบทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ

ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 [ 9 ] ได้กำหนดการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ดังนี้

1. หัวฉีดไอเกลือแต่ละหัว มีอัตราการไหลสารละลายเกลือ ( flow rate ) 30 ลิตร / ชั่วโมง ( ใช้ภาชนะรองน้ำจากแต่ละหัว แล้วจับเวลา จากนั้นคำนวณหาอัตราการไหล ถ้าผลคำนวณยังไม่ได้ 30 ลิตร / ชั่วโมง ให้ทำการปรับวาล์ว ที่หัวนั้น ๆ เพิ่ม หรือ ลด ดำเนินการทดสอบใหม่จนกว่าจะได้ค่าที่กำหนด )
2. หัวฉีดมีอัตราจ่ายลม 700 kPa ( โดยอ่านจากเกจวัดแรงดันของปั๊มลม )
3. เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดสารละลายเกลือ มีขนาด 2.0 มม.
4. เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดลม มีขนาด 1.2 มม.
5. ระยะห่างหัวฉีดลมและหัวฉีดสารละลายต่างกัน 3.0 มม. ตามแนวนอน
6. จุดกึ่งกลางของอุปกรณ์ทดสอบอยู่แนวเดียวกับจุดกึ่งกลางของความสูงของหัวฉีด ( ทั้งนี้เพื่อให้การพ่นไอเกลือมีความสม่ำเสมอ ทั่วลูกถ้วยทดสอบ )
7. จำนวนหัวฉีด ( N ) เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$N = ( h / 0.6 ) + 3 \quad (3.1)$$

โดยที่ h คือความยาวของอุปกรณ์ทดสอบ ( ลูกถ้วย ) ในหน่วยเมตร

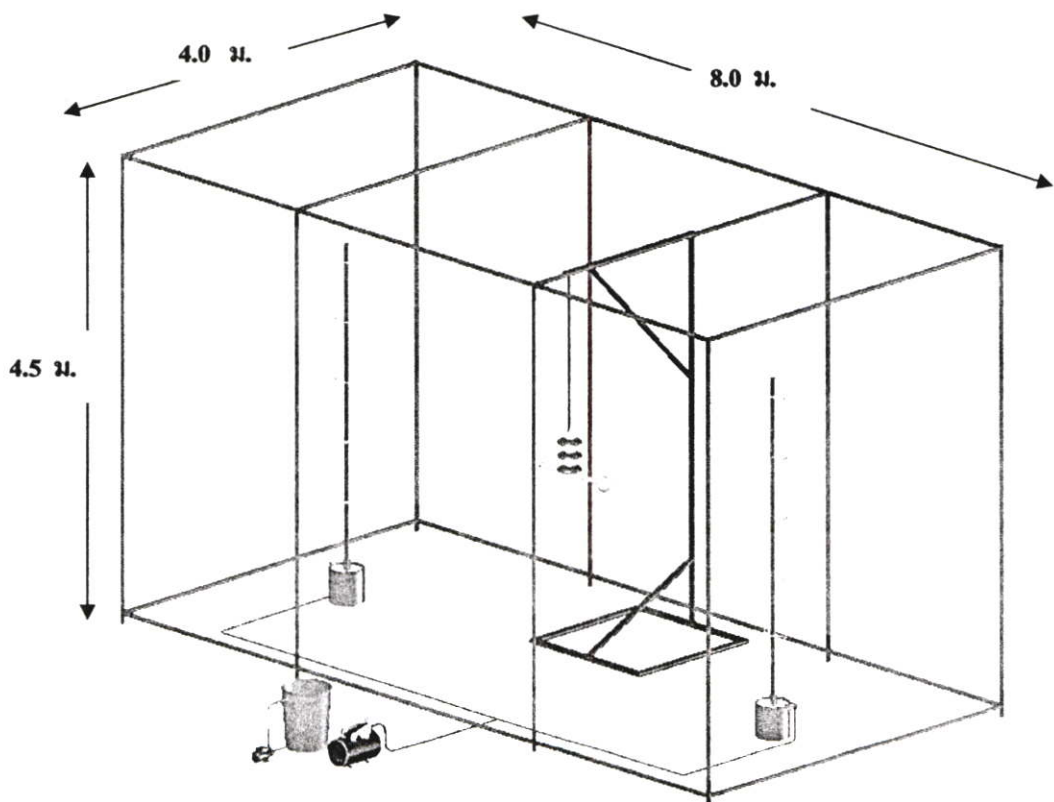
เนื่องจาก ลูกถ้วยพอร์ซเลนทดสอบ ในระบบ 33 kV เมื่อนำมาต่อกัน 4 ลูก ยาว 0.6 เมตร จากสมการ (3.1) เมื่อแทนค่าแล้วจะได้ จำนวนหัวฉีดต่อดัน คิดเป็น

$$N = ( 0.6 / 0.6 ) + 3$$

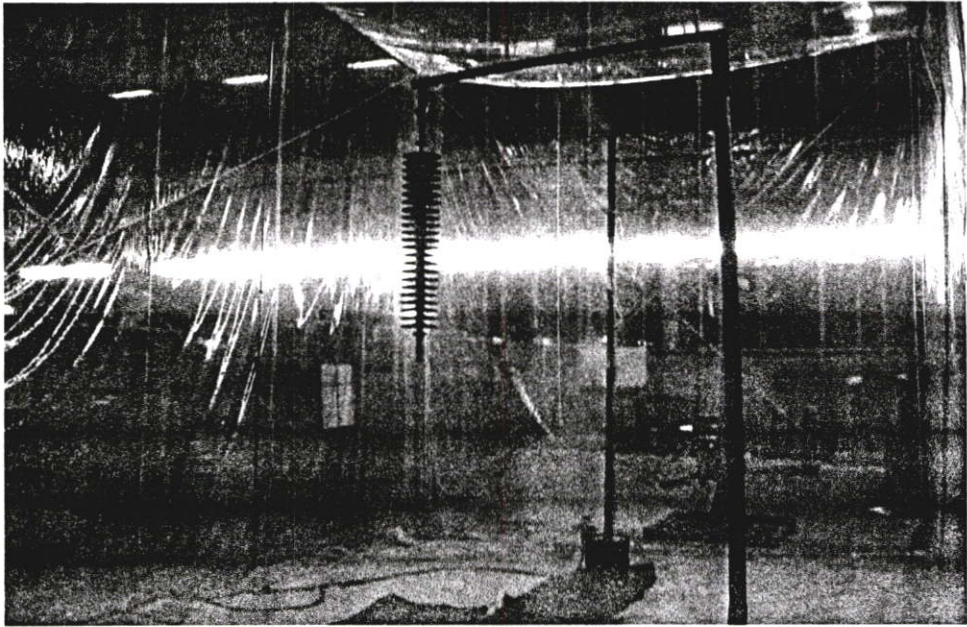
$$= 4 \quad \text{หัว}$$

8. ระยะห่างของแต่ละหัวฉีด 60 ซม. ในเสาดันเดียวกัน
9. ระยะห่างของเสาคิดตั้งหัวฉีดจากอุปกรณ์ทดสอบ ข้างละ 3.0 เมตร
10. ระยะห่างของอุปกรณ์ทดสอบสูงจากพื้นอย่างน้อย 1.5 เมตร

จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน ดังกล่าวข้างต้น จึงทำการออกแบบกระโจมทดสอบ โดยมีขนาด กว้าง 4.0 เมตร ยาว 8.0 เมตร สูง 4.5 เมตร ซึ่งภายในกระโจม สามารถจัดวางเสาแขวนลูกถ้วย เสาติดตั้งหัวพ่นลมและสารละลายเกลือ โดยมีระยะได้ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ดังรูป 3.2 ( ก ) และ ( ข )

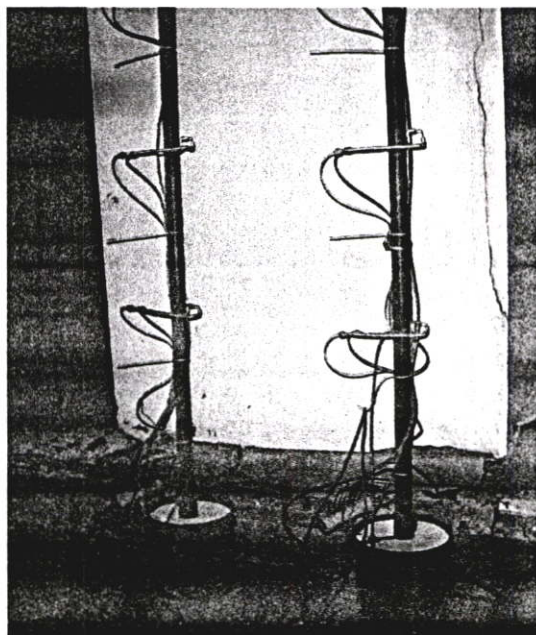


( ก )



( ข )

รูปที่ 3.2 กระจกทดสอบถูกด้วยภายใต้ภาวะเปราะเปื้อนไอเกลือ ( ก ) ภาพการออกแบบตามมาตรฐาน ( ข ) กระจกที่ประกอบแล้วตามมาตรฐาน



รูปที่ 3.3 เสาที่ติดตั้งหัวฉีคลมและสารละลายเกลือออกแบบตามมาตรฐาน

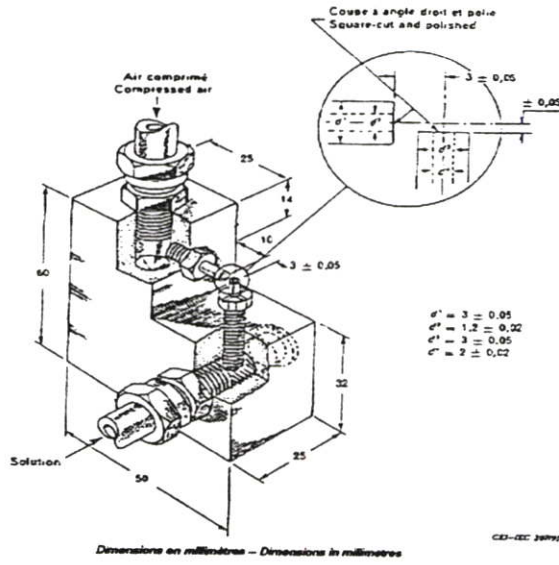
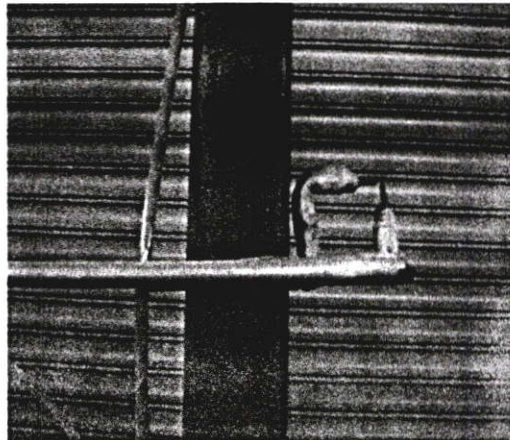


Figure 2 - Construction type d'un pulvérisateur de brouillard  
 Typical construction of fog spray nozzle

( ก )



( ข )

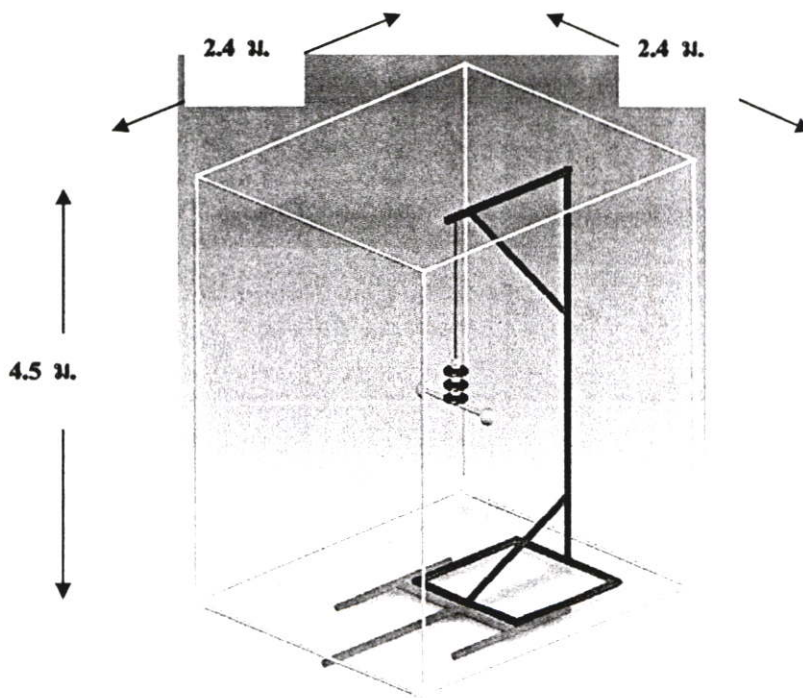
รูปที่ 3.4 หัวฉีดลมและสารละลายเกลือตามมาตรฐาน ( ก )  
 และหัวฉีดที่ออกแบบจริง ( ข )

### 3.5 ข้อกำหนดและการออกแบบระบบทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง

การทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผง ตามมาตรฐานได้กำหนดดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไอน้ำมีอัตราการจ่ายไอน้ำ 0.05 กก./ ชั่วโมง / ลูกบาศก์เมตร
2. ปลายอุปกรณ์ทดสอบสูงจากพื้น 1.5 เมตร
3. ชุดจ่ายไอน้ำวางบนพื้น อยู่ใต้อุปกรณ์ทดสอบ และจ่ายไอน้ำสม่ำเสมอเท่า ๆ กัน

จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน จึงทำการออกแบบกระโจมรูปสี่เหลี่ยม โดยมีขนาด กว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร และสูง 4.5 เมตร ดังรูป 3-5 ( ความกว้างและยาวคิดจากรยะห่างจากลูกถ้วยทดสอบที่ใช้งานไม่เกิน แรงดันระบบ 115 kV หรือแรงดันเฟส 66 kV คือ 0.7 ม. + ระยะเพื่ออีกข้างละ 50 ม. จะได้ขนาดเป็น  $0.7 + 0.5 = 1.2$  ม. ส่วนความสูงคิดจากรยะห่างปลายอุปกรณ์ทดสอบจากพื้น 2.0 ม. + ความยาวอุปกรณ์ทดสอบ (115 kV) 1.2 ม. + ระยะห่างจากปลายอุปกรณ์ทดสอบถึงกระโจมด้านบน 1.2 ม. คิดเป็น 4.4 ม. )



รูปที่ 3.5 กระโจมทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปราะเป็นฝุ่นผงที่ออกแบบตามมาตรฐาน กระโจมมีขนาด กว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร สูง 4.5 เมตร

### 3.5.1 การออกแบบชุดกำเนิดไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ออกแบบ เป็นเครื่องกำเนิดไอน้ำรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 36 ซม. สูง 80 ซม. เต็มน้ำ 40 ลิตร หรือคิดเป็น 40 กก. ( ความจุถึง 60 ลิตร ) ใช้ขดลวดไฟฟ้าเพื่อต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ ความร้อนที่ต้องใช้เพื่อให้น้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอน้ำ ( Q ) มีค่าเท่ากับ [ 1 ]

$$Q = m c \Delta T \quad ( 3.2 )$$

$$= m c ( T_2 - T_1 ) \quad ( 3.3 )$$

โดยที่ Q คือ ปริมาณความร้อนที่จ่ายให้น้ำเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็น ไอน้ำ มีหน่วยเป็น จูล

m คือ มวลของน้ำ มีหน่วยเป็น กก.

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ มีค่า 4186 จูล / กก. °C

$\Delta T$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำจาก  $T_1$  ไปเป็น  $T_2$

แทนค่าใน ( 3.3 ) จะได้  $Q = ( 40 ) ( 4186 ) ( 100 - 30 )$  จูล  
 $= 11,720,800$  จูล

จาก  $P = \frac{Q}{t} \quad ( 3.4 )$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าในหน่วยวัตต์ หรือ จูลต่อวินาที

Q คือ พลังงานความร้อน หน่วย จูล

t คือ ระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน ในหน่วยวินาที

ขดลวดที่ใช้มีกำลัง 9000 วัตต์ ดังนั้น จะใช้เวลาในการต้มน้ำให้เดือด โดยใช้เวลา

$$t = \frac{Q}{P}$$

$$t = \frac{11720800}{9000 \times 60}$$

$$= 21.7 \text{ นาที}$$

### 3.5.2 การควบคุมอัตราการป้อนไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

เนื่องจากมาตรฐานกำหนด หม้อต้มน้ำมีอัตราการจ่ายไอน้ำ 0.05 กก. / ชั่วโมง / ลบ.ม. ปริมาตรกระโจมที่ออกแบบมีค่า

$$2.4 \times 2.4 \times 4.5 = 25.9 \cong 26 \text{ ลบ.ม.}$$

ดังนั้น อัตราการจ่ายไอน้ำสำหรับกระโจมที่ออกแบบ คิดเป็น

$$0.05 \times 26 = 1.3 \text{ กก. / ชั่วโมง}$$

ถ้าให้อัตราการจ่ายไอน้ำในเวลา 20 นาที

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นปริมาณไอน้ำ} \quad \frac{0.05 \times 26}{3} &= 0.433 \text{ กก. / 20 นาที} \\ &= 433 \text{ กรัม / 20 นาที} \end{aligned}$$

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไอน้ำออกแบบเป็นภาชนะปิด ปริมาตรน้ำที่ลดลงมีค่าเท่ากับปริมาณไอน้ำที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะเมื่อน้ำที่ลดลงได้รับความร้อน เนื่องจากน้ำ 1 ลบ. ซม.หนัก 1 กรัม ดังนั้น ไอน้ำ 433 กรัม คิดเป็นปริมาตรน้ำ 433 ลบ. ซม. จากลักษณะเครื่องกำเนิดไอน้ำที่เป็นทรงกระบอกที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง 36 ซม. สามารถหาความสูงของทรงกระบอกหรือ ปริมาตรน้ำที่ลดลงได้ คือ

$$V = \pi r^2 h \quad \text{ลบ. ซม.} \quad (3.5)$$

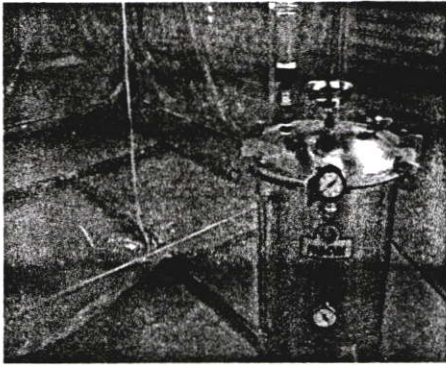
$$h = V / \pi r^2 \quad \text{ซม.} \quad (3.6)$$

แทนค่า  $V = 433$  ลบ. ซม. ,  $r = 18$  ซม. ในสมการ (3.6) จะได้

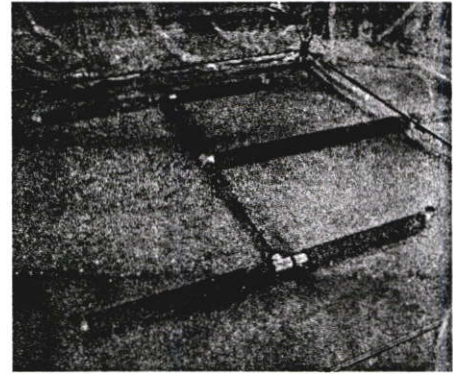
$$\begin{aligned} h &= 433 / \pi (18)^2 \\ &= 0.42 \text{ ซม. หรือ } 4.2 \text{ มม.} \end{aligned}$$

การให้เครื่องกำเนิดไอน้ำจ่ายไอน้ำได้ 433 กรัม / 20 นาที ปริมาตรของน้ำในหลอดแก้ว วัดระดับของเครื่องกำเนิดไอน้ำจะลดลง 4 มม.

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำเมื่อมีการต่อใช้งานกับท่อจ่ายไอน้ำ สำหรับการทดสอบลูก ด้วยภายใต้ภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง จำนวน 3 ครั้ง พบว่า เมื่อป้อนแรงดันเฉลี่ย 181 V ให้กับขดลวดเครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยใช้กระแสเฉลี่ย 9.1 A หลังจากจ่ายไอน้ำเป็นเวลา 20 นาที ปริมาตรน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ลดลงโดยเฉลี่ย 4 มม.



( ก ) ชุดกำเนิดไอน้ำ



( ข ) ชุดจ่ายไอน้ำ

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง

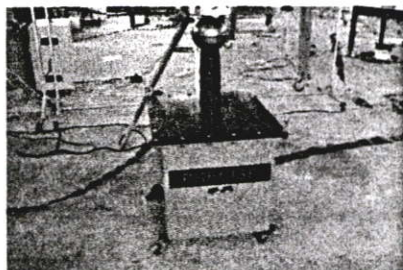
### 3.6 ข้อกำหนดและการออกแบบระบบทดสอบภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

ในการทดสอบลูกด้วยสะอาด คิวไอน้ำ จะใช้อุปกรณ์ทดสอบ รวมถึงกระโจมที่ใช้ในการทดสอบของการทดสอบลูกด้วยภายใต้ภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง ซึ่งลูกด้วยที่ใช้จะเป็นลูกด้วย พอร์ซเลนและลูกด้วยโพลีเมอร์ที่แห้งสะอาด ส่วนการจ่ายไอน้ำ จะใช้อัตราเดียวกันกับอัตราการจ่ายไอจากหม้อต้มภายใต้ภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง

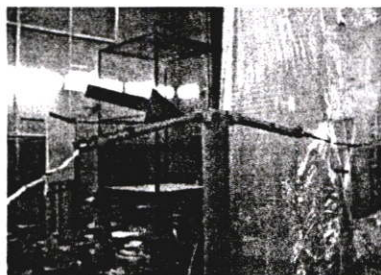
### 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบลูกด้วยภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนไอเกลือและฝุ่นผง วงจรทดสอบประกอบด้วย หม้อแปลงทดสอบ ขนาดพิกัด 5 kVA, 100 kV เป็นอุปกรณ์ป้อนแรงดันให้กับลูกด้วย โดยใช้เครื่อง Variac เป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันและใช้ความต้านทานน้ำ ขนาด 350 กิโลโอห์ม เป็น

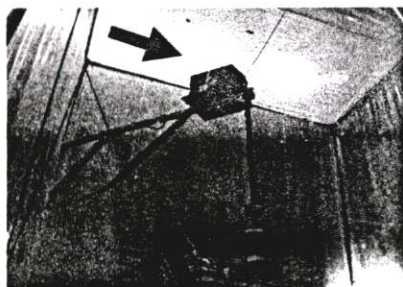
อุปกรณ์ในการจำกัดกระแส ในการวัดปริมาณกระแสรั่วไหล ใช้หม้อแปลงกระแส ( Current Transformer : CT ) ที่มีอัตราส่วน 40:1 ส่วนกรณีตรวจจับการเกิดโคโรนาที่ลูกถ้วย ใช้กล้องตรวจจับโคโรนา รุ่น Corocam II



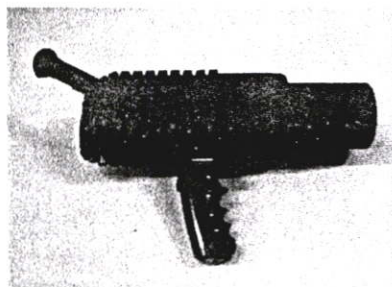
( ก ) หม้อแปลงทดสอบ



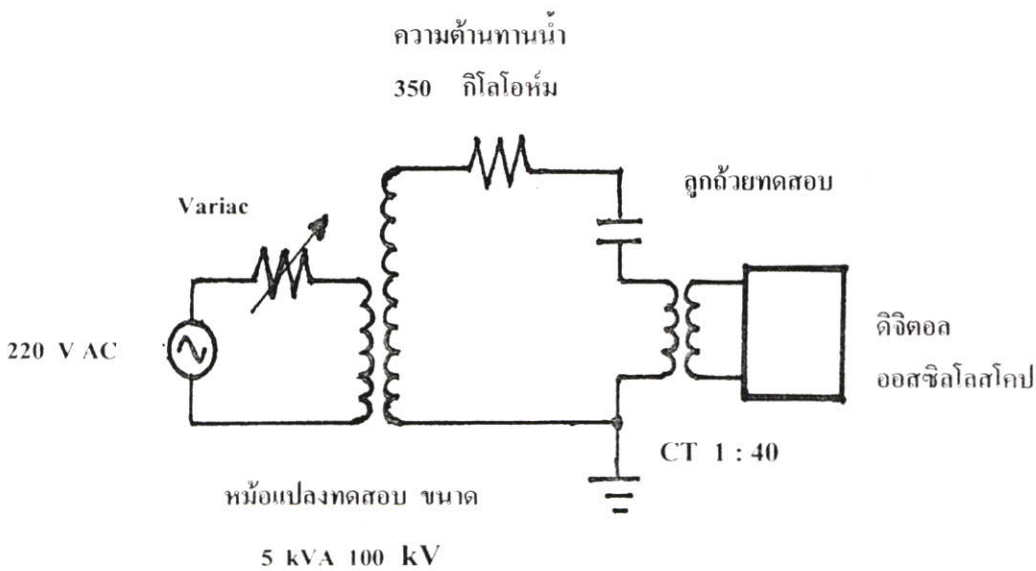
( ข ) ความต้านทานน้ำ



( ค ) หม้อแปลงวัดกระแสรั่วไหล



( ง ) กล้องตรวจจับโคโรนา Corocam II



( จ ) วงจรทดสอบ

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนและวงจรทดสอบ

### 3.8 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะประะเป็อนไอเกลือ และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ

สารละลายเกลือที่ใช้สำหรับการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะประะเป็อนไอเกลือ สามารถเตรียมได้โดยการผสมเกลือกับน้ำสะอาดตามความเข้มข้น ( Salinity ) ที่กำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 จากนั้น รอประมาณ 2 นาทีแล้วจึง นำไปวัดค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งค่าที่ได้ควรใกล้เคียงกับค่าความนำไฟฟ้าในมาตรฐาน สำหรับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะประะเป็อนไอเกลือ เป็นไปตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะประะเป็อนไอเกลือ

ความเข้มข้นสารละลายเกลือ / น้ำทะเล ( Salinity )	ค่าความนำไฟฟ้า ตามมาตรฐาน ( S/m )	ค่าความนำไฟฟ้า ที่วัดได้ ( S/m )
น้อย	1.15	1.17
ปานกลาง	4.1	3.97
มาก	10.0	9.88
สูงมาก	17.0	17.8
น้ำทะเล	-	4.11

### 3.9 การเตรียมฝุ่นผงที่ใช้ในการเคลือบลูกถ้วยเพื่อการทดสอบภาวะประะเป็อน ฝุ่นผง และค่า ESDD ของฝุ่นผงชนิดต่างๆ

ฝุ่นผงที่ใช้เคลือบลูกถ้วย มี 4 ชนิด คือ ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และเกาลิน โดยได้แบ่งระดับของความประะเป็อนเป็น 3 ระดับ คือ ระดับความประะเป็อนน้อย ระดับความประะเป็อนปานกลาง และระดับความประะเป็อนมาก ตามลำดับ [ 9 ] ในการเคลือบลูกถ้วยด้วยฝุ่นผงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 มีขั้นตอน ดังนี้

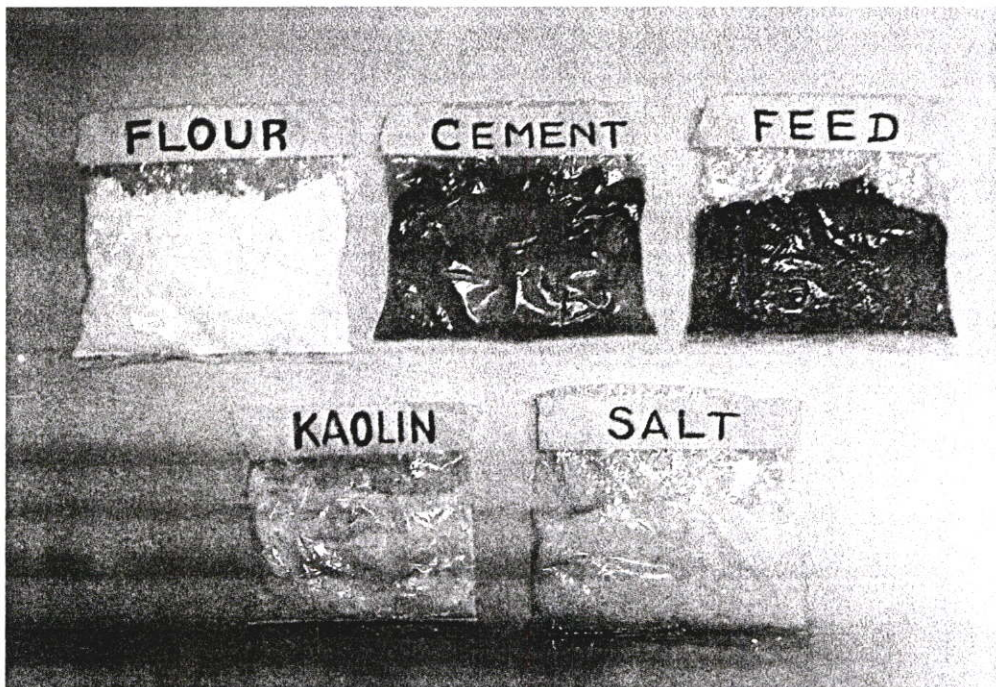
1. เตรียมฝุ่นแป้ง ระดับความประะเป็อนต่ำ ตามส่วนผสมที่กำหนดในตาราง 3-2 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบรรจุในกาพ่น จากนั้นนำไปพ่นบนลูกถ้วยพอร์ชเลนทั่วพื้นผิวแล้วนำไปอบแห้ง
2. เตรียมฝุ่นแป้ง ระดับความประะเป็อนปานกลาง และสูง ตามส่วนผสมที่กำหนดในตาราง 3-2 แล้วดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 1.

เมื่อพ่นฝุ่นแป้งลูกด้วยพอร์ชเลนทั้ง 3 ระดับแล้ว ให้ดำเนินการ เช่นเดียวกับข้อ 1. ( การเตรียมฝุ่นแป้งระดับความเปรอะเปื้อนต่ำ ) และ 2. ( การเตรียมฝุ่นแป้งระดับความเปรอะเปื้อนปานกลางและสูง ) สำหรับลูกด้วยโพลีเมอร์ ส่วนการเคลือบลูกด้วยทั้งพอร์ชเลนและโพลีเมอร์ด้วยฝุ่นชนิดอื่น ๆ ให้ดำเนินการเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของฝุ่นในแต่ละระดับความเปรอะเปื้อนที่ใช้ในการเคลือบลูกด้วย

ระดับความเปรอะเปื้อน	ปริมาณฝุ่นผงแต่ละชนิด ( กรัม )	น้ำ ( ลิตร )	เกลือ ( กรัม )
น้อย	40	1	3
ปานกลาง	40	1	13
มาก	40	1	60

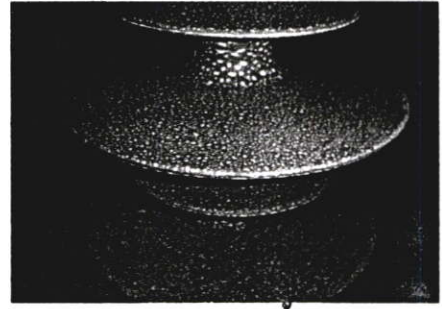
**หมายเหตุ** ปริมาณเกลือที่ใช้ ได้จากการทดลองเดิมเกลือที่ละน้อย เพื่อให้ได้ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายหลังจากผสมกันตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางข้างบน ( ฝุ่นแต่ละชนิด 40 กรัม และน้ำ 1 ลิตร ) สอดคล้องกับระดับความเปรอะเปื้อน 3 ระดับตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 และ ไอ อี ซี 815



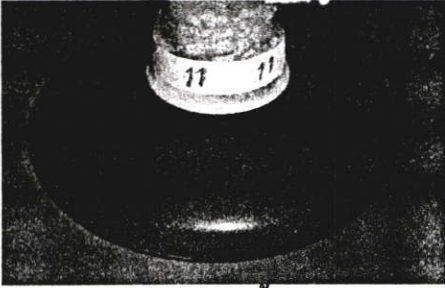
รูปที่ 3.8 ฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการเคลือบลูกด้วย



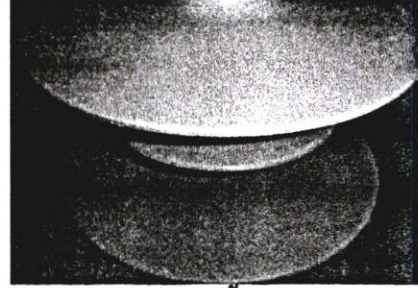
( ก ) พอร์ซเลนเปราะเป็นฝุ่นแป้ง



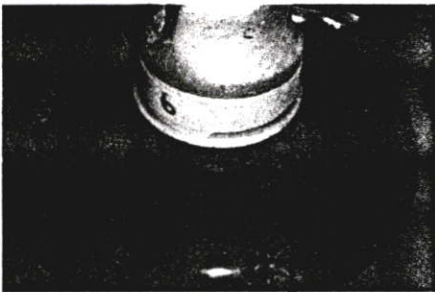
( ข ) โพลีเมอร์เปราะเป็นฝุ่นแป้ง



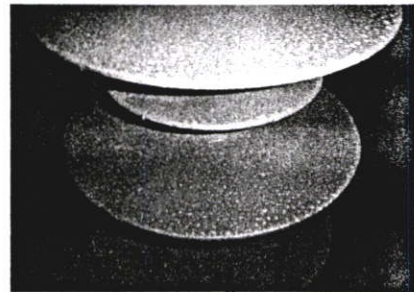
( ค ) พอร์ซเลนเปราะเป็นฝุ่นอาหารสัตว์



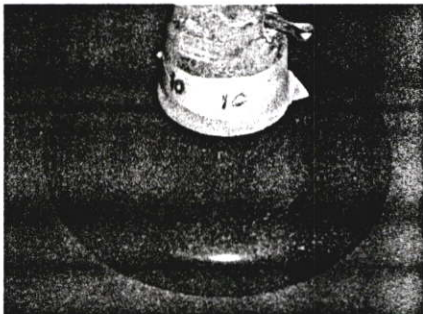
( ง ) โพลีเมอร์เปราะเป็นฝุ่นอาหารสัตว์



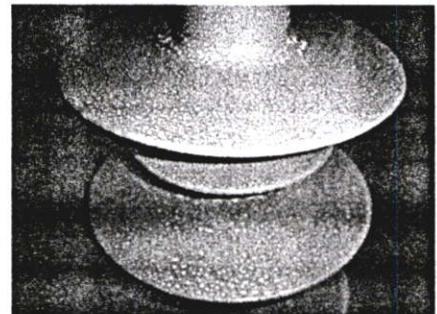
( จ ) พอร์ซเลนเปราะเป็นฝุ่นซิเมนต์



( ฉ ) โพลีเมอร์เปราะเป็นฝุ่นซิเมนต์



( ช ) พอร์ซเลนเปราะเป็นเกาลิน



( ซ ) โพลีเมอร์เปราะเป็นเกาลิน

รูปที่ 3.9 ลูกถ้วยหลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.3 ค่า ESDD ของฝุ่นชนิดต่าง ๆ ในแต่ละระดับความเปรอะเปื้อนที่ใช้ในการ เคลือบ ลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ ( วิธีการหาค่าได้ในหัวข้อ 2.11 )

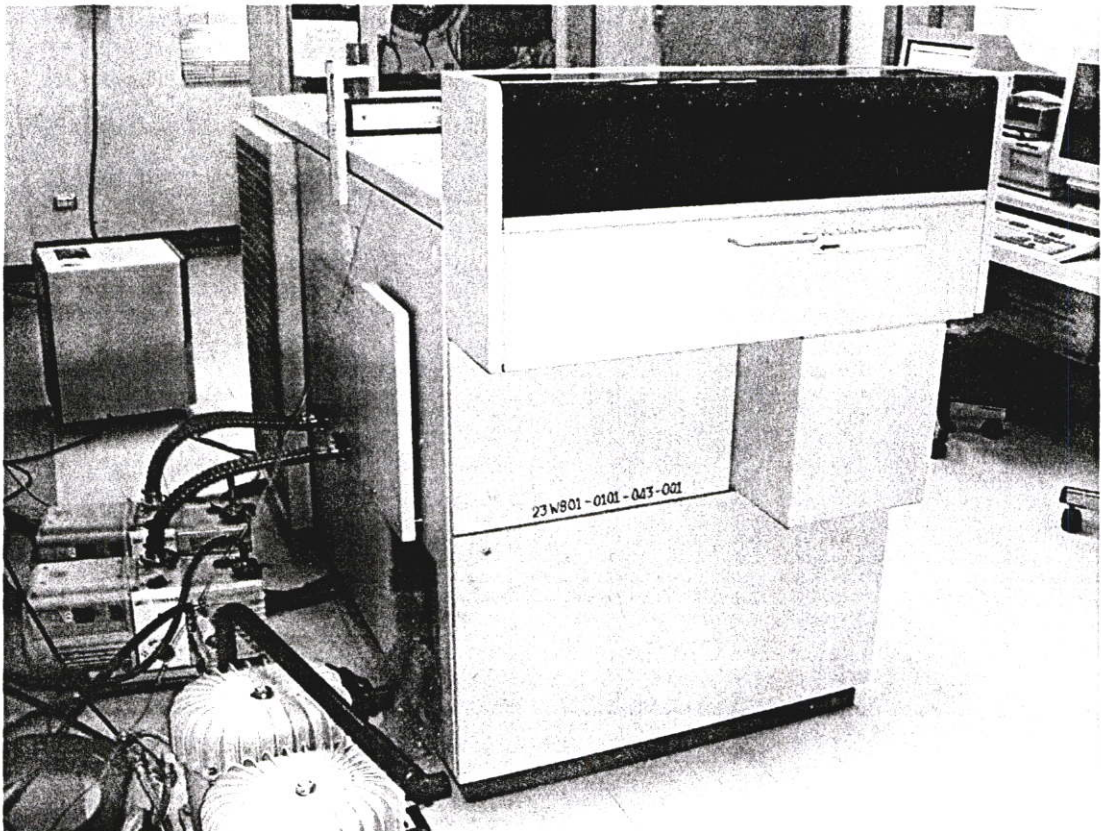
ระดับความ เปรอะเปื้อน	ค่า ESDD ( mg / cm <sup>2</sup> )			
	ลูกถ้วยพอร์ซเลน			
	ฝุ่นแป้ง	ฝุ่นอาหารสัตว์	ฝุ่นซิเมนต์	เกาลิน
ต่ำ	0.0534	0.065	0.0412	0.063
กลาง	0.061	0.067	0.063	0.086
สูง	0.187	0.093	0.125	0.311

ระดับความ เปรอะเปื้อน	ค่า ESDD ( mg / cm <sup>2</sup> )			
	ลูกถ้วยโพลีเมอร์			
	ฝุ่นแป้ง	ฝุ่นอาหารสัตว์	ฝุ่นซิเมนต์	เกาลิน
ต่ำ	0.045	0.034	0.037	0.033
กลาง	0.13	0.037	0.056	0.057
สูง	0.36	0.193	0.2	0.13

### 3.10 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของฝุ่นผงที่ใช้ในการเคลือบลูกถ้วยเพื่อการทดสอบ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน

ในการตรวจสอบส่วนประกอบฝุ่นผงที่ใช้ในการทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนนั้น สามารถ  
ดำเนินการด้วย กระบวนการฉายรังสีเอ็กซ์ ไปยังสารประกอบที่ต้องการศึกษาแล้วตรวจจับการ  
ปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอน หรือ ที่เรียกกันว่า เอ็กซ์ อาร์ เอฟ ( XRF : X-Ray  
Fluorescence Spectrometry ) ซึ่งกระบวนการดังกล่าว ดำเนินการโดยเตรียมตัวอย่างฝุ่นผงที่  
ต้องการวิเคราะห์หนัก 0.5 กรัม และผงบอริกแอซิด หนัก 4.5 กรัม ผสมเข้าด้วยกันด้วย  
เครื่องมือสม นาน 1 นาที จากนั้น นำไปเข้าเครื่องอัดเพื่อขึ้นรูปด้วยแรง 150 กิโลนิวตัน  
จากนั้น นำไปเข้าเครื่องตรวจวัด XRF ซึ่งจะใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์นานประมาณ 20  
นาที สำหรับเครื่องตรวจวัดดังกล่าวประกอบด้วยหลอดซึ่งปล่อยรังสีเอ็กซ์ และหลอดฟลูออเรส  
เซนซ์ ไปยังตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ในเครื่องมือดังกล่าว มีอุปกรณ์ตรวจจับและวิเคราะห์

สารประกอบ 4 ชนิด ซึ่งแต่ละชุดตรวจจับชนิดของธาตุหลายตัวตามตารางธาตุ หลังจากตรวจจับชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของฝุ่นผงแล้ว สามารถวิเคราะห์อัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ ได้จากการตรวจสอบส่วนประกอบของฝุ่นผงที่ใช้ในการทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนด้วยกระบวนการยิงอนุภาคอิเล็กตรอนจากรังสีเอ็กซ์ หรือ เอ็กซ์ อาร์ เอฟ ( XRF : X-Ray Fluorescent Spectrometry ) พบว่า ฝุ่นที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าวประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (  $\text{SiO}_2$  ) ไคโอลูมิเนียมไตรออกไซด์ (  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ) เป็นต้น สัดส่วนสารประกอบของฝุ่นแต่ละชนิดที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐานสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.10 เครื่องตรวจหาสารประกอบของฝุ่นผง เอ็กซ์ อาร์ เอฟ รุ่น SRS 3400

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนสารประกอบของฝุ่นแต่ละชนิดที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบกับเกาลินที่กำหนดในมาตรฐาน ไอ อี ซี 507

สารประกอบ	ชนิดของฝุ่นที่ใช้ทดสอบ ( % )			
	ฝุ่นแป้ง	ฝุ่นอาหารสัตว์	ฝุ่นซิเมนต์	เกาลิน
ซิลิกอนไดออกไซด์ ( SiO <sub>2</sub> )	21.1	3.48	58.9	40-50
ไดออลูมิเนียมไตรออกไซด์ ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	35.5	0.871	7.55	30-40
ไดเฟอร์รัสไตรออกไซด์ ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.4		4.56	0.3-2
แมกนีเซียมออกไซด์ ( MgO )	17.5	2.95	1.91	
แคลเซียมออกไซด์ ( CaO )	3.53	65.1	26.9	
คอปเปอร์ออกไซด์ ( CuO )	7.24	0.906		
น้ำ ( H <sub>2</sub> O )				7-14
ไดฟอสฟอรัสเตตราออกไซด์ ( P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		8.85		
ฟอสฟอรัสไตรซัลไฟด์ ( SO <sub>3</sub> )		5.65		
คลอรีน ( Cl )		2.35		
ไดโปแตสเซียมออกไซด์ ( K <sub>2</sub> O )		7.11		
ไดฟอสฟอรัสไตรออกไซด์ ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		1.66		
พัลลาเดียม ( Pd )	3.01	0.23		
วูลแฟรมเมียมไตรออกไซด์ ( WO <sub>3</sub> )	3.03			
โรเดียม ( Rh )	1.64	0.212		
อลูมิเนียม ( Al )	1.05			

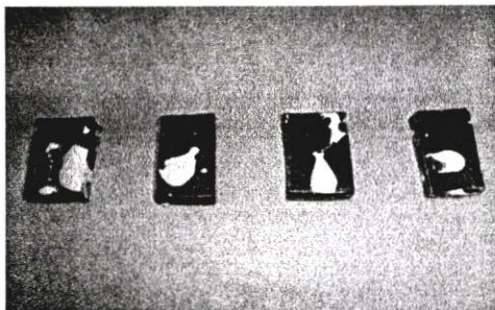
ตารางที่ 3.4 ( ต่อ )

สารประกอบ	ชนิดของฝุ่นที่ใช้ทดสอบ ( % )			
	ฝุ่นแป้ง	ฝุ่นอาหารสัตว์	ฝุ่นซิเมนต์	เกาติน
แมงกานีสออกไซด์ ( MnO )		0.221		
คอปเปอร์ออกไซด์ ( CuO )		0.906		
ซิงค์ออกไซด์ ( ZnO )		0.28		
ไอโอดีน ( I )		0.384		
พลูโคเนียม ( Pt )		0.269		

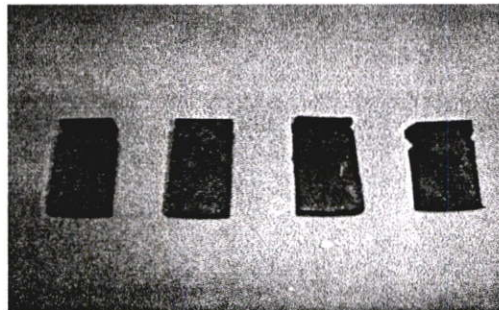
### 3.11 การศึกษาคุณสมบัติของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง [21 ][22 ]

เนื่องจากได้มีการนำลูกถ้วยโพลีเมอร์มาใช้แทนลูกถ้วยพอร์ซเลนในบริเวณเปรอะเปื้อนไอเกลือ เช่น โรงงานในนิคมอุตสาหกรรมในเขตภาคตะวันออกของประเทศไทย และบริเวณเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ได้แก่บริเวณโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ในการนำลูกถ้วยโพลีเมอร์มาใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อนฝุ่นผงนั้น ควรมีการศึกษาคุณสมบัติของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของลูกถ้วยโพลีเมอร์ ในเรื่อง ความต้านทานฉนวน ( Insulation Resistance ) ลักษณะการจับเกาะฝุ่นผงบนผิวของฉนวนโพลีเมอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ( Scanned Electron Microscopy : SEM ) การเกาะเป็นหยดน้ำบนผิวของฉนวนโพลีเมอร์ ( Hydrophobic )

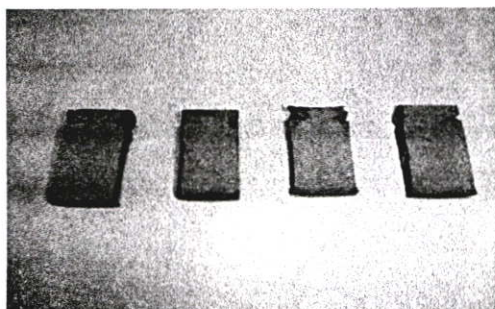
การศึกษาความต้านทานฉนวนนั้น มีการเตรียมตัวอย่างซึ่งได้มาจากฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ขนาด 1.0 เซนติเมตร ขาว 2.0 เซนติเมตร จำนวน 36 ตัวอย่าง โดยมีกรณีศึกษาจำนวน 6 กรณี กรณีละ 6 ตัวอย่าง ได้แก่ ฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะไอเกลือน้อย ไอเกลือปานกลาง และไอเกลือมาก ฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นแป้ง ฝุ่นปูนและฝุ่นอาหารสัตว์ ตามลำดับ การเตรียมตัวอย่างภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนต่าง ๆ นั้น สามารถดำเนินการโดยเตรียมสารละลายชนิดต่าง ๆ ตามสภาวะเปรอะเปื้อน 6 ชนิด ( เกลือน้อย เกลือปานกลาง เกลือมาก ฝุ่นแป้ง ฝุ่นปูนและฝุ่นอาหารสัตว์ ) จากนั้น ก่อขัง เติสารละลายแต่ละชนิดลงบนตัวอย่าง ชนิดละ 6 ตัวอย่าง ปล่อยให้แห้ง เพื่อดำเนินการทดสอบต่อไป รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์หลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานฉนวน ( Insulation resistance )



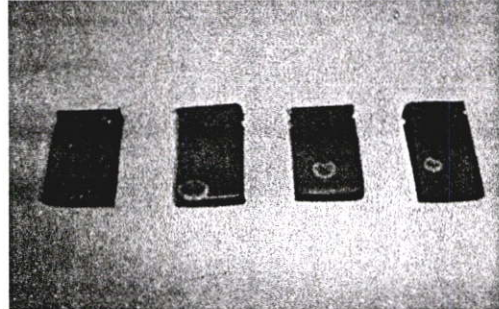
( ก ) โพลีเมอร์เปรอะเปื้อนฝุ่นแป้ง



( ข ) โพลีเมอร์เปรอะเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์

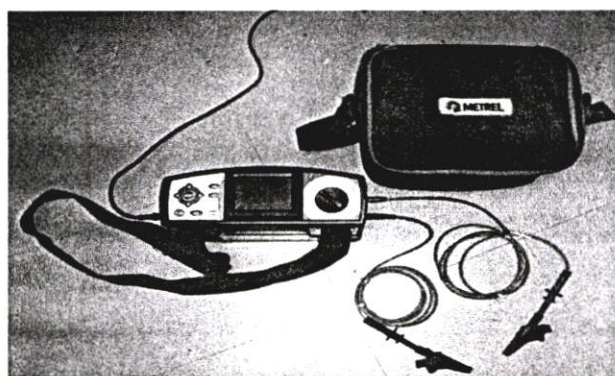


( ค ) โพลีเมอร์เปรอะเปื้อนฝุ่นซีเมนต์



( ง ) โพลีเมอร์เปรอะเปื้อนไอเกลือ

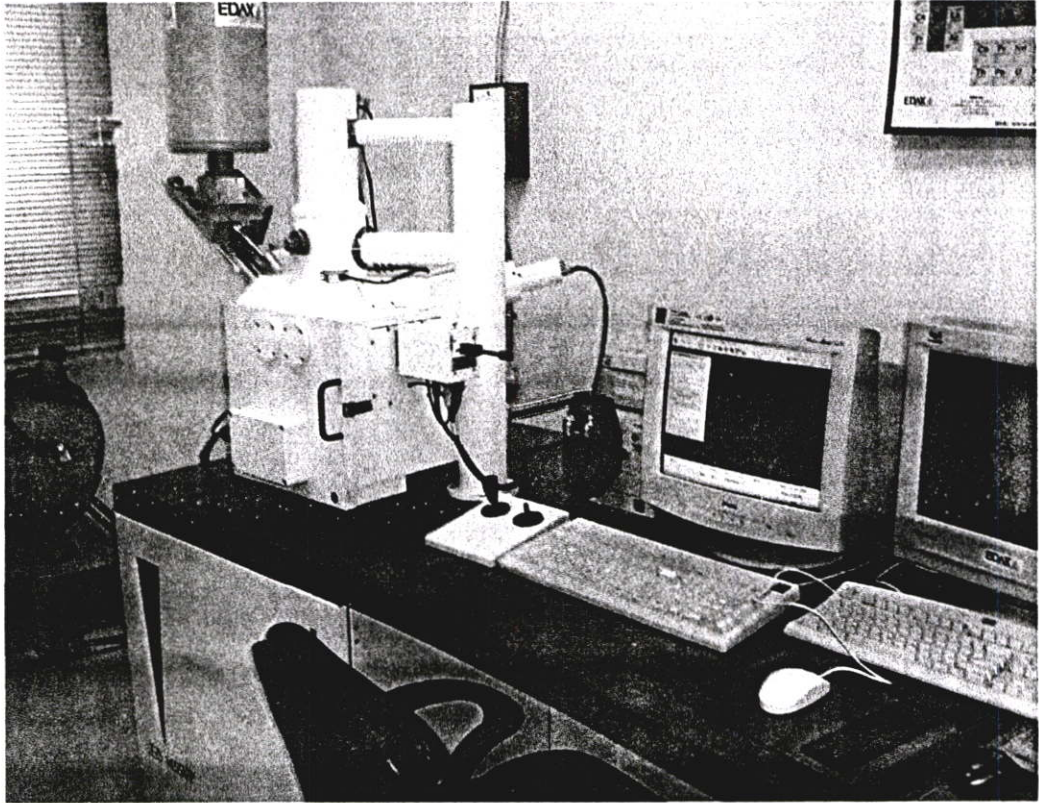
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์หลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่าง ๆ ที่ใช้  
ในการศึกษาความต้านทานฉนวน ( Insulation resistance )



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดค่าความต้านทานฉนวน METREL วัดที่ปลายทั้งสองของตัวอย่างทดสอบ

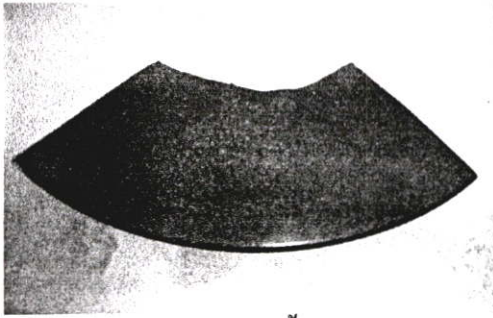
การจับเกาะฝุ่นผงบนผิวของฉนวนโพลีเมอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope ) สามารถดำเนินการโดยเตรียมตัวอย่าง จากการศึกษาความต้านทานฉนวน ที่ได้กล่าวในย่อหน้าที่แล้ว จำนวน 6 ตัวอย่าง ตามสภาวะเปรอะเปื้อน 6 ชนิดในวันแรก และจำนวน 6 ตัวอย่าง ตามสภาวะเปรอะเปื้อน 6 ชนิดในวันที่ 15 ที่อุณหภูมิ 30 °C

และจำนวน 6 ตัวอย่าง ตามสภาวะแปรอะเป็อน 6 ชนิดในวันที่ 15 ที่อุณหภูมิ 50 ° C ตามลำดับ เพื่อนำไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนต่อไป

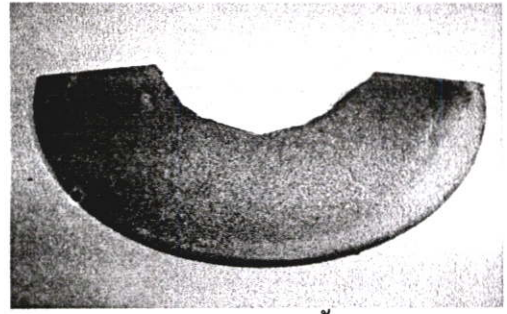


รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope )

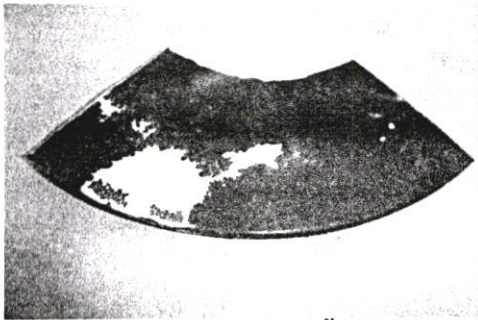
การศึกษาคูสมบัติการเกาะเป็นหยดน้ำของฉนวนบนผิวโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะแปรอะเป็อนไอเกลือและฝุ่นผงนั้น เริ่มต้นโดยเตรียมตัวอย่างซึ่งได้มาจากฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยมีกรณีศึกษาจำนวน 6 กรณี กรณีละ 6 ตัวอย่าง ได้แก่ ฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะไอเกลืออ่อน ไอเกลือปานกลางและไอเกลือมาก ฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะแปรอะเป็อนฝุ่นแป้ง ฝุ่นปูนและฝุ่นอาหารสัตว์ตามลำดับ การเตรียมตัวอย่างภายใต้สภาวะแปรอะเป็อนต่าง ๆ นั้น ( เกลืออ่อน เกลือปานกลาง เกลือมาก ฝุ่นแป้ง ฝุ่นปูนและฝุ่นอาหารสัตว์ ) จากนั้นเตรียมสารละลายชนิดต่าง ๆ ตามสภาวะแปรอะเป็อน 6 ชนิด จากนั้น ก่อขง เทสารละลายแต่ละชนิดลงบนตัวอย่าง ชนิดละ 2 ตัวอย่าง ปล่อยให้แห้งเพื่อดำเนินการทดสอบต่อไป รูปที่ 3-14 แสดงตัวอย่างฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์หลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาคูสมบัติการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวน ( Hydrophobic )



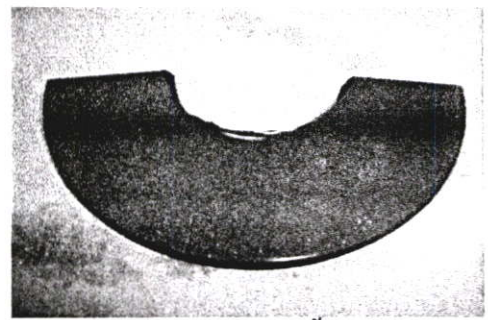
( ก ) โพลีเมอร์เปราะเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์



( ข ) โพลีเมอร์เปราะเปื้อนฝุ่นปลาน



( ค ) โพลีเมอร์เปราะเปื้อนฝุ่นแป้ง



( ง ) โพลีเมอร์เปราะเปื้อนไอเกลือ

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างฉนวนถูกด้วยโพลีเมอร์หลังจากเคลือบด้วยฝุ่นผงต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการเป็นหยคน้ำบนผิวฉนวน ( Hydrophobic )

## บทที่ 4

# การทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 4.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ในสภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test ) การทดสอบลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Solid Layer Test ) การทดสอบลูกถ้วยสะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test ) การวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Insulation resistance ) การตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope : SEM ) และการทดสอบการป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Hydrophobic ) รวมถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

การทดสอบลูกถ้วยในสภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือและฝุ่นผงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 นั้น จะดำเนินการทดสอบลูกถ้วยจนกระทั่งเกิดการแฟลชโอเวอร์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการทดสอบว่าลูกถ้วยนั้น มีความเหมาะสมสำหรับการนำใช้งานในสภาวะที่มีโอกาสเกิดการเปรอะเปื้อนไอเกลือและฝุ่นผง แต่ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยในวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการศึกษาลูกถ้วยในกรณีที่เกิดโคโรนาในระยะเริ่มต้นว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับระดับความเปรอะเปื้อนไอเกลือและฝุ่นผง ตามมลภาวะในประเทศไทยเมื่อเทียบกับมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 เท่านั้น ดังนั้น ในการทดสอบลูกถ้วย จึงดำเนินการทดสอบโดยตรวจจับแรงดันและกระแสรั่วไหลในขณะที่เกิดโคโรนาเริ่มต้น

การเกิดโคโรนาเป็นปรากฏการณ์การเกิดจุดเรืองแสงที่ผิวลูกถ้วย สามารถเกิดได้โดยรอบผิวลูกถ้วย ด้านบน ด้านล่าง สามารถตรวจจับได้โดยใช้กล้องโคโรนา

ในการทดสอบลูกถ้วยทั้งสองชนิดภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ จะใช้สารละลายเกลือตามความเข้มข้นที่กำหนดในมาตรฐาน 4 ค่า คือ ที่ความเข้มข้น 7 ( ความเข้มข้นน้อย ) , 28 ( ความเข้มข้นปานกลาง ) , 80 ( ความเข้มข้นมาก ) และ 160 ( ความเข้มข้นสูงมาก ) กก. / ลบ.ม. ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ระบุตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 และน้ำทะเลซึ่งเป็นสารละลายตามมลภาวะในประเทศไทย ส่วนการทดสอบลูกถ้วยสองชนิดภายใต้สภาวะฝุ่นผงนั้น จะใช้ ฝุ่นแป้งข้าวโพด ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ เป็นฝุ่นตามมลภาวะในประเทศไทยและเกาหลี ซึ่งเป็นฝุ่นผงที่กำหนดตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 โดยส่วนผสมของฝุ่นผงที่ใช้ แต่ละชนิด 40

กรัม น้ำ 1000 กรัม และส่วนผสมของเกลือ 3, 13 และ 60 กรัม ตามลำดับ ( ตารางที่ 3-2 หัวข้อ 3.9 บทที่ 3 ) โดยที่ส่วนผสมของเกลือจะแทนระดับความเปรอะเปื้อนของฝุ่นผงที่ใช้ทดสอบ ส่วนการทดสอบลูกด้วยภายใต้ไอน้ำจะใช้ลูกด้วยผิวสะอาดและไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ

#### 4.2 การทดสอบลูกด้วยภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อนไอเกลือโดยใช้ สารละลายเกลือ และน้ำทะเล ( Salt Fog Test )

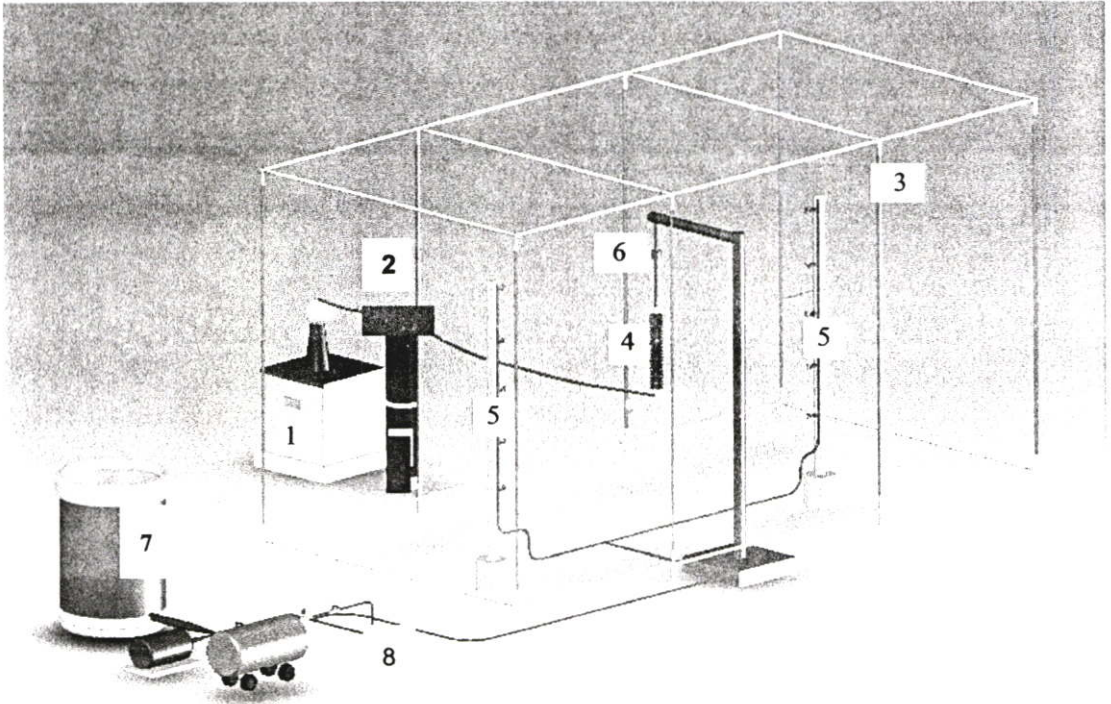
การทดสอบการทดสอบลูกด้วยภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อนไอเกลือโดยใช้ สารละลายเกลือ และน้ำทะเล เพื่อต้องการศึกษาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกด้วยพอร์ซเลนและลูกด้วยโพลีเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้ภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือโดยใช้สารละลายเกลือความเข้มข้น 4 ระดับ คือ ระดับความเข้มข้นน้อย ความเข้มข้นปานกลาง ความเข้มข้นมาก ความเข้มข้นสูงมาก ตามลำดับโดยเปรียบเทียบกับน้ำทะเล

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ ดำเนินการได้โดย หลังจากจัดวางอุปกรณ์ทดสอบสำหรับการทดสอบลูกด้วย ภายใต้ภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ตามรูป 4.1 แล้ว เริ่มต้นทำการทดสอบด้วยลูกด้วยพอร์ซเลนชุดที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยลูกด้วย 4 ลูกและใช้น้ำสะอาด ในการทดสอบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เปิดวาล์วจ่ายน้ำพร้อมกับเปิดวาล์วจ่ายลม สังเกตแรงดันลมควรอยู่ที่ประมาณ 7 บาร์
2. ป้อนแรงดันให้กับลูกด้วยทดสอบ 19 kV ( แรงดันเฟสของระบบไฟฟ้า 33 kV )
3. ใช้กล้องส่องโคโรนาตรวจจับว่าเกิดโคโรนาหรือไม่ ( โดยคงแรงดันไว้ที่ประมาณ 1 นาที ) ถ้าไม่เกิดโคโรนา ให้เพิ่มแรงดันครั้งละ 5 kV จนกระทั่งสังเกตว่ามีโคโรนาเกิดขึ้น กรณีเกิดโคโรนาแล้ว ให้บันทึก ค่าแรงดันและกระแสรั่วไหลแล้วลดแรงดันลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ กรณีไม่เกิดโคโรนาให้เพิ่มแรงดันที่ป้อนให้กับลูกด้วยจนจนกระทั่งเกิดโคโรนา โดยที่ให้ออกแรงดันสูงสุดของพวงลูกด้วยไม่เกิน 55 kV แล้วลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์
4. ทำการกราวด์ ปิดวาล์วจ่ายน้ำและลม ระบายอากาศ ในกระโจน เปลี่ยนลูกด้วยพอร์ซเลนชุดที่ 2

ในการทดสอบให้ทำการทดสอบลูกด้วยพอร์ซเลนและลูกด้วยโพลีเมอร์ ชนิดละ 3 ชุด เมื่อดำเนินการทดสอบครบแล้ว เปลี่ยนจากน้ำสะอาดเป็นสารละลายเกลือเข้มข้นน้อย ดำเนินการตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น และทำการทดสอบกับสารละลายเกลือเข้มข้นปานกลาง เข้มข้นสูงและเข้มข้นสูงมาก และน้ำทะเลตามลำดับ ในการทดสอบแต่ละครั้งจะบันทึกแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหล แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาวัด โดยการป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบด้านปฐมภูมิ ( แรงต่ำ ) ซึ่งผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดัน ( Variac ) และมีมิเตอร์ เมื่อไต่ระดับตามที่ดัด

ตรวจจับโคโรนาได้ ให้อ่านค่าจากมิเตอร์ แล้วแปลงค่านั้นตามอัตราส่วนของหม้อแปลงทดสอบ ก็จะได้ค่าแรงดันที่เกิดโคโรนาจริง การวัดการเกิดโคโรนาพิจารณาจากการเกิดจุดเรืองแสงที่ปรากฏครั้งแรกในกระบวนการทดสอบที่ผิวหรือส่วนอิเล็กโทรดของลูกถ้วย ไม่ว่าจะเกิดโคโรนาที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของลูกถ้วยใดลูกถ้วยหนึ่ง หรือเกิดจุดเรืองแสงมากกว่าหนึ่งจุดในเวลาเดียวกัน และสังเกตการเกิดโคโรนาซึ่งต้องเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาที



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ โดยที่

1. หม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 5 kVA 100 kV
2. ความต้านทานน้ำ 350 กิโลโห์ม
3. กระจังทดสอบขนาด ก x ย x ส 4x8x4.5 m<sup>3</sup>
4. ลูกถ้วยทดสอบ ( ปลายข้างหนึ่งของลูกถ้วยทดสอบต่อลงดิน )
5. หัวฉีดสารละลายเกลือและลม
6. หม้อแปลงกระแส แปลงขึ้น 1 : 40
7. ชุดบรรจุมอเตอร์ละลายเกลือ
8. ปุ่มลม

### 4.3 ผลการทดลองภายใต้ภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( Salt Fog Test )

ผลการทดลองลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือตามการทดลอง หัวข้อ 4.2 แสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และรูปที่ 4.2, 4.3 ตามลำดับ ในการทดสอบแต่ละระดับความเปรอะเปื้อนนั้น จะดำเนินการทดสอบโดยใช้ลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์อย่างละ 3 ชุด และนำผลการทดสอบแต่ละครั้งมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV )		หมายเหตุ
	ลูกถ้วยพอร์ซเลน	ลูกถ้วยโพลีเมอร์	
น้ำทะเลภาคตะวันออก ( SS )	65.4	52.9	มลภาวะประเทศไทย
เกลือเข้มข้นน้อย ( S1 )	65.3	61.6	มาตรฐาน ไอ อี ซี 507
เกลือเข้มข้นปานกลาง ( S2 )	65.2	59.6	
เกลือเข้มข้นมาก ( S3 )	63.2	49.2	
เกลือเข้มข้นสูงมาก ( S4 )	64.3	46.2	

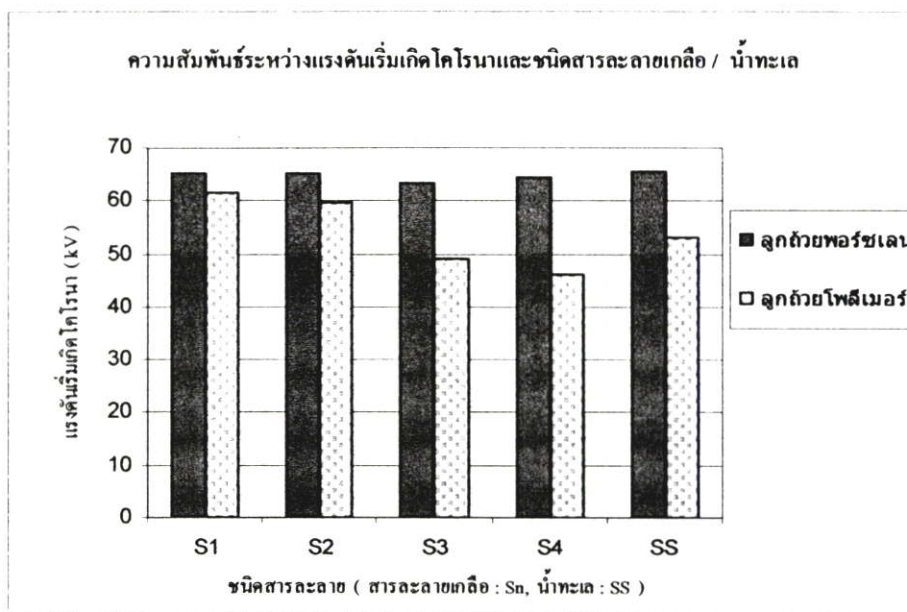
หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของลูกถ้วย 3 ชุด

ตารางที่ 4.2 กระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ( อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ 1 : 40 )

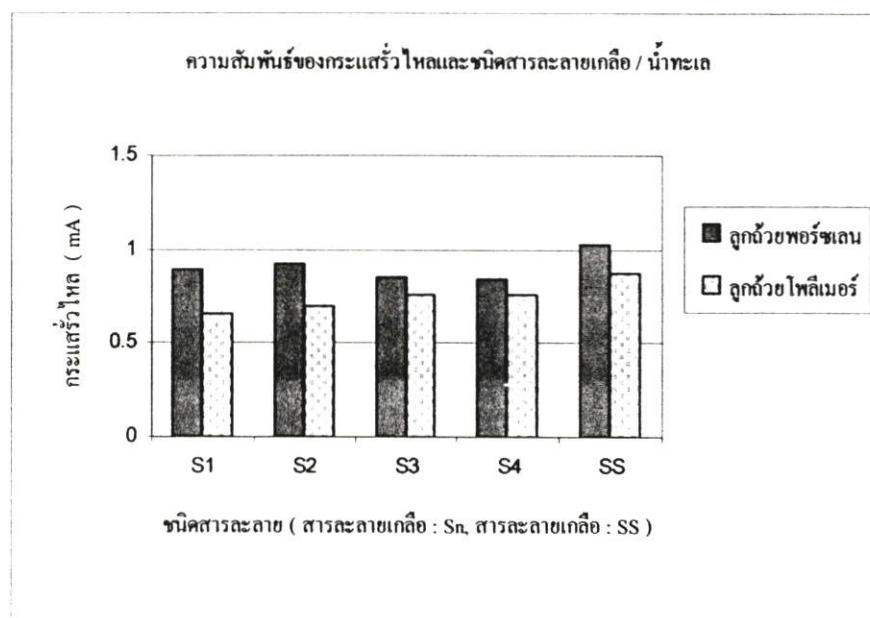
สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ	กระแสรั่วไหล ( mA )		หมายเหตุ
	ลูกถ้วยพอร์ซเลน	ลูกถ้วยโพลีเมอร์	
น้ำทะเลภาคตะวันออก ( SS )	1.0	0.8	มลภาวะประเทศไทย
เกลือเข้มข้นน้อย ( S1 )	0.8	0.6	มาตรฐาน ไอ อี ซี 507
เกลือเข้มข้นปานกลาง ( S2 )	0.9	0.7	
เกลือเข้มข้นมาก ( S3 )	0.8	0.7	
เกลือเข้มข้นสูงมาก ( S4 )	0.8	0.7	

หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของลูกถ้วย 3 ชุด

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 นำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ในรูปของกราฟแท่งได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ

จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 4.2 และรูป 4.3 พบว่า ที่แต่ละระดับความเข้มข้นสารละลายเกลือ แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนสูงกว่าลูกถ้วยโพลีเมอร์ และเมื่อระดับความเข้มข้นสารละลายเกลือเพิ่มขึ้น แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลน ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์มีแนวโน้มลดลง การที่เป็นเช่นนี้ เป็นเพราะผิวฉนวนโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติในการจับเกาะของไอเกลือได้ง่ายกว่าลูกถ้วยพอร์ซเลน ซึ่งจะทำให้การนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ผลทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาต่ำกว่า และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นสารละลายเกลือ ทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ มีแนวโน้มลดลง

ขณะเดียวกัน เมื่อระดับความเข้มข้นสารละลายเกลือเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนลดลงเล็กน้อย ในขณะที่กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น นั่นคือ เมื่อฉนวนโพลีเมอร์จับเกาะไอเกลือได้ง่าย การนำไฟฟ้าของลูกถ้วยโพลีเมอร์จึงเพิ่มขึ้น ผลทำให้กระแสรั่วไหลจึงสูงขึ้น

จากผลดังกล่าว การใช้งานของลูกถ้วยโพลีเมอร์ของลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างยังไม่ค่อยเหมาะสมนักที่จะนำมาใช้งานในบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก ถึงแม้ว่าค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาจะสูงกว่าค่าแรงดันใช้งานของระบบ 33 kV ( 19 kV ) เนื่องจากเมื่อระดับความเข้มข้นสารละลายเกลือเพิ่มขึ้น แรงดันเริ่มเกิดโคโรนามีแนวโน้มลดลง ( อย่างไรก็ตามควรดำเนินการทดสอบวาวไฟตามผิวลูกถ้วยตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ เพื่อยืนยันถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนก่อนนำไปใช้งานต่อไป )

เมื่อพิจารณาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ภาวะไอเกลือจากน้ำทะเลพบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยโพลีเมอร์ จากตารางที่ 3.1 บทที่ 3 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำทะเล และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือเข้มข้นปานกลางมีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 4.2 และรูป 4.3 พบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ เมื่ออยู่ภายใต้ น้ำทะเล และสารละลายเกลือเข้มข้นปานกลางผลใกล้เคียงกัน กล่าวคือ แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยโพลีเมอร์ แสดงว่า ลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สามารถจำลองการทดสอบการใช้งานของลูกถ้วยภายใต้สภาวะเกลือชายฝั่งทะเลตะวันออกของไทยได้

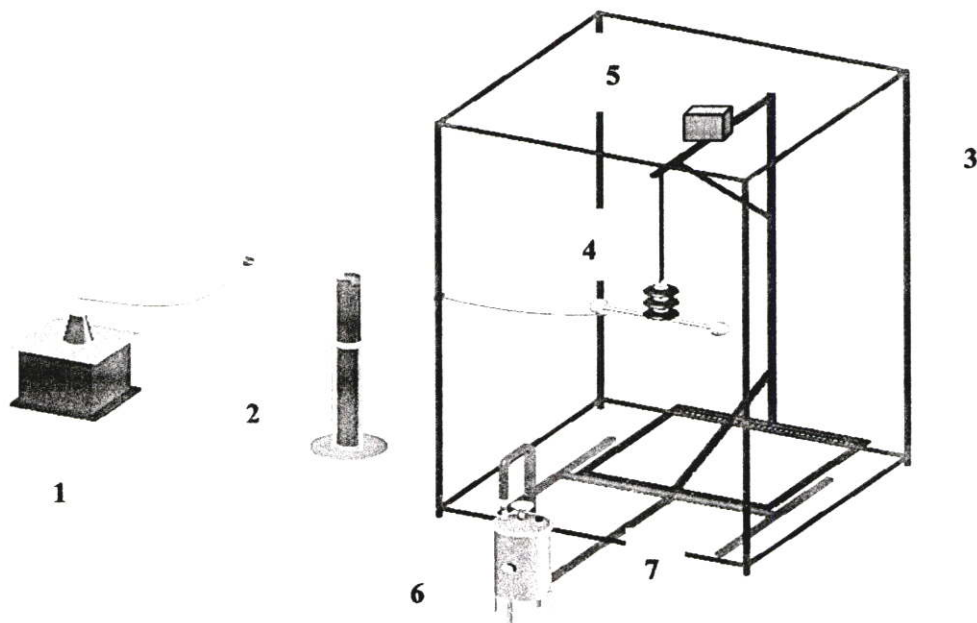
#### 4.4 การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงโดยใช้ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และเกาลิน ( Solid Layer Test )

การทดสอบการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อนฝุ่นผงโดยใช้ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และเกาลิน เพื่อต้องการศึกษาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงโดยใช้ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ ( ฝุ่นจากโรงงานอุตสาหกรรม ) โดยเปรียบเทียบกับเกาลิน ( ฝุ่นที่กำหนดตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 )

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ ดำเนินการได้โดยจัดเตรียมวงจรทดสอบตามรูปที่ 4-4 และทำการควบคุมความดันเครื่องกำเนิดไอน้ำอยู่ที่ประมาณ 10 Psi ( ปอนด์ / ตารางนิ้ว ) แล้วให้ปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. ทำการป้อนแรงดันให้กับพวงลูกถ้วยพอร์ซเลนเปรอะเปื้อนเกาลินน้อยชุดที่ 1 เริ่มตั้งแต่ 0 kV จนกระทั่งถึง 19 kV ( แรงดันเฟส ของระบบ 33 kV )
  2. ที่ระดับแรงดัน 19 kV ใช้กล้องส่องโคโรนาตรวจจับลูกถ้วยว่าเกิดโคโรนาหรือไม่ ( โดยคงแรงดันไว้ที่ประมาณ 5 นาที ) ถ้าไม่เกิดให้ดำเนินการตามข้อ 3
  3. เปิดวาล์วจ่ายไอน้ำจากหม้อต้ม จากนั้น ใช้กล้องส่องโคโรนาตรวจจับ กรณีที่เกิดโคโรนาให้บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่วไหล แล้วลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์ กรณีที่ไม่เกิดโคโรนาให้เพิ่มแรงดันครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดโคโรนา บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่วไหล แล้วลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์ กรณีที่ยังไม่เกิดโคโรนา การเพิ่มแรงดันทดสอบเพิ่มได้สูงสุดไม่เกิน 55 kV ( เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบในห้องปฏิบัติการมีขนาดเล็ก จึงต้องจำกัดแรงดันสูงสุดสำหรับการทดสอบแต่ละครั้งเพื่อความปลอดภัย )
  4. ทำการกราวด์ ปิดวาล์วจ่ายไอน้ำ เปิดกระโจມและระบายอากาศ
  5. ดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนที่ 1.4 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนเปรอะเปื้อนเกาลินน้อย 2 ชุด และลูกถ้วยโพลีเมอร์เปรอะเปื้อนเกาลินน้อย 3 ชุด เมื่อทดสอบครบแล้ว ให้ดำเนินการทดสอบ ตามขั้นตอนที่ 1.4 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์เปรอะเปื้อนเกาลินปานกลางและสูงตามลำดับ
  6. ดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนที่ 1.5 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นแป้ง ซิเมนต์และฝุ่นอาหารสัตว์ ตามลำดับ
- แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา วัดโดยการป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบด้านปฐมภูมิ ( แรงค่า ) ซึ่งผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดัน ( Variac ) และมิเตอร์ เมื่อโหรงก็ตามที่กล้องตรวจจับโคโรนาที่เกิดขึ้นอย่างค่อนงน้อยอย่างน้อย 1 นาทีได้ ให้อ่านค่าแรงดันจากโวลต์มิเตอร์ แล้วแปลงค่านั้นตามอัตราส่วนของหม้อแปลงทดสอบ ก็จะได้ค่าแรงดันที่เกิดโคโรนาจริง การวัดการเกิดโคโรนาพิจารณาจากการเกิดจุดเรืองแสงจุดแรก

ที่ผิวลูกถ้วย ไม่ว่าจะเกิดโคโรนาที่ผิวลูกถ้วยใดลูกถ้วยหนึ่ง หรือเกิดจุดเรืองแสงมากกว่าหนึ่งจุด ในเวลาเดียวกัน และสังเกตการเกิดโคโรนาเป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาที



รูปที่ 4.4 วงจรทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง โดยที่

1. หม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 5 kVA 100 kV
2. ความต้านทานน้ำ 350 กิโลโอห์ม
3. กระจังทดสอบ ขนาด  $2.4 \times 2.4 \times 4.5 \text{ m}^3$
4. ลูกถ้วยทดสอบ
5. หม้อแปลงกระแส แบบแปลงขึ้น 1 : 40
6. หม้อคัมไอน้ำ ขนาด 60 ลิตร
7. ชุดจ่ายไอน้ำ

#### 4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง โดยใช้ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และเกาลิน ( Solid Layer Test )

ผลการทดลองลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงตามการทดลอง หัวข้อ 4.4 แสดงในตารางที่ 4.3, 4.4 และรูปที่ 4.5 ถึง 4.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ  
เปราะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ ( ฝุ่นเกาลินเป็นฝุ่นทดสอบตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 )

ชนิดลูกถ้วย	ระดับความ เปราะเปื้อน	ฝุ่นแป้ง	ฝุ่นอาหารสัตว์	ฝุ่นซิเมนต์	ฝุ่นเกาลิน
พอร์ซเลน	ต่ำ	48.3	19.0	50.0	21.7
	กลาง	46.0	21.0	45.0	19.0
	สูง	45.0	19.0	51.7	19.0
โพลีเมอร์	ต่ำ	55.0	55.0	55.0	51.7
	กลาง	55.0	45.0	55.0	34.0
	สูง	53.3	33.0	55.0	26.3

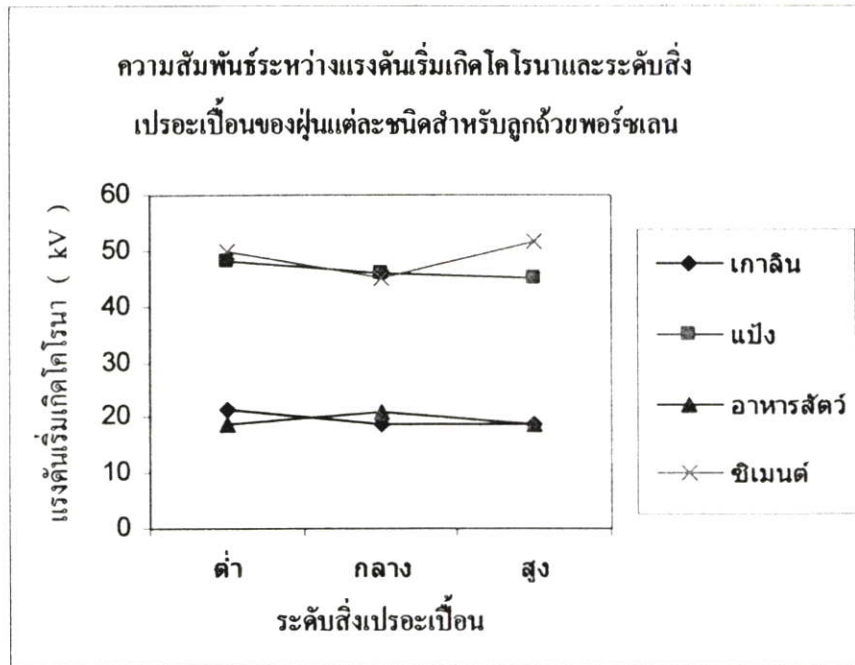
หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของลูกถ้วย 3 ชุด

ตารางที่ 4.4 กระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะ  
เปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ ( ฝุ่นเกาลินเป็นฝุ่นทดสอบตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 )

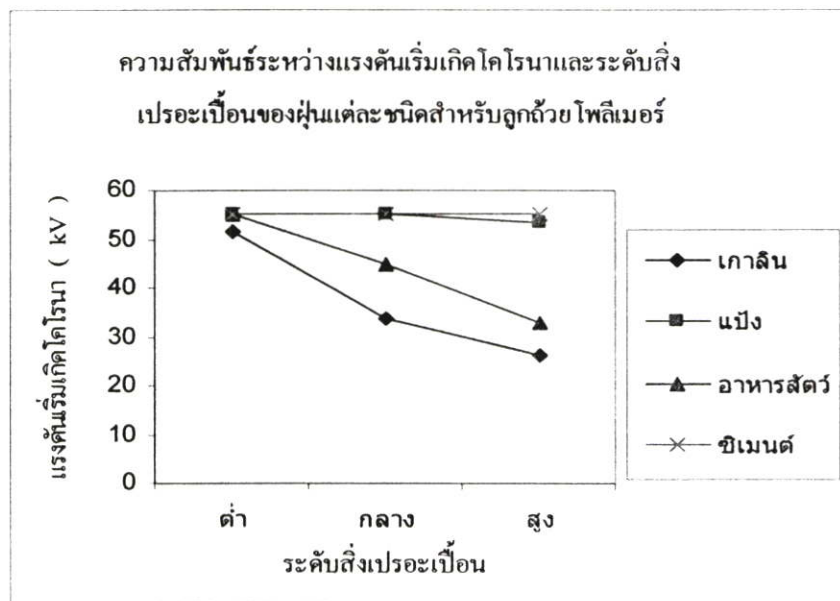
ชนิดลูกถ้วย	ระดับความ เปราะเปื้อน	ฝุ่นแป้ง	ฝุ่นอาหารสัตว์	ฝุ่นซิเมนต์	ฝุ่นเกาลิน
พอร์ซเลน	ต่ำ	0.9	0.8	0.9	1.0
	กลาง	0.9	0.9	0.8	1.2
	สูง	0.9	2.1	0.8	1.2
โพลีเมอร์	ต่ำ	0.9	0.8	1.2	0.9
	กลาง	0.9	0.8	1.0	0.9
	สูง	0.9	0.8	1.0	0.9

หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของลูกถ้วย 3 ชุด

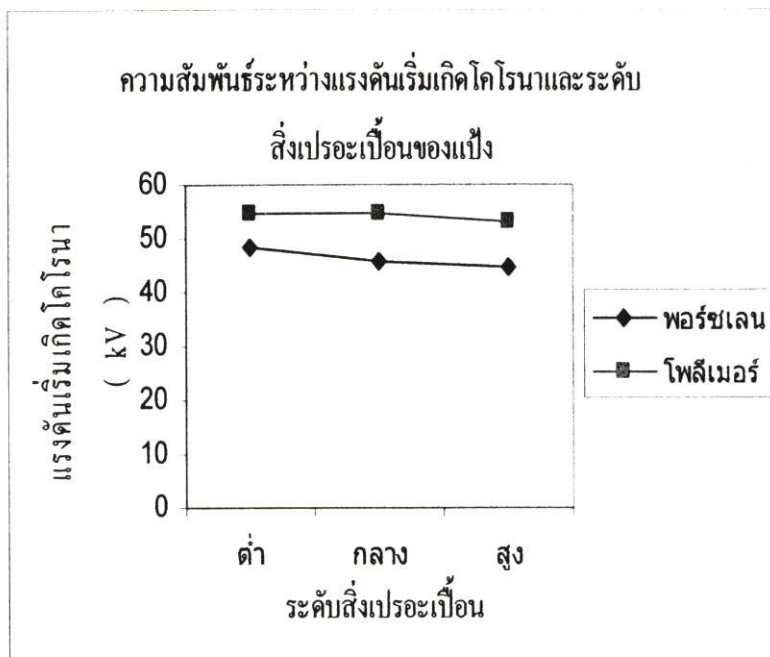
จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 นำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ ดังนี้



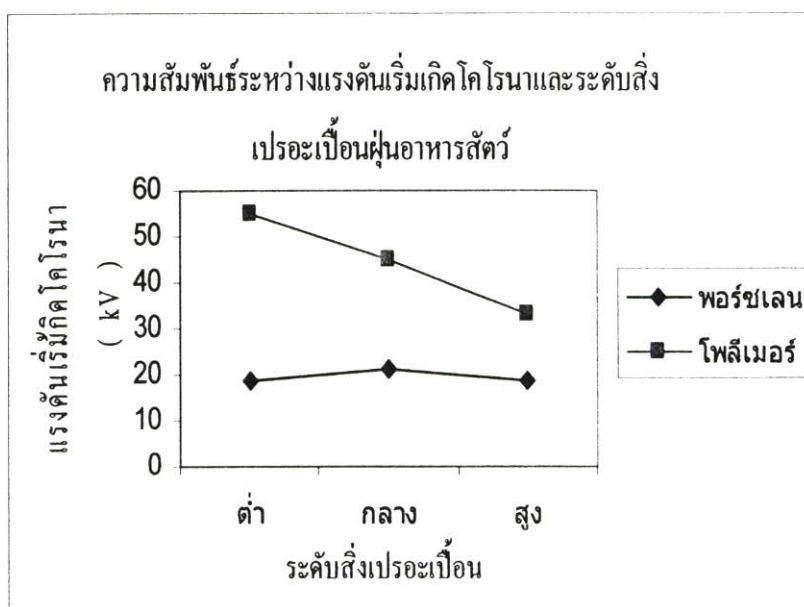
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลน  
ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ



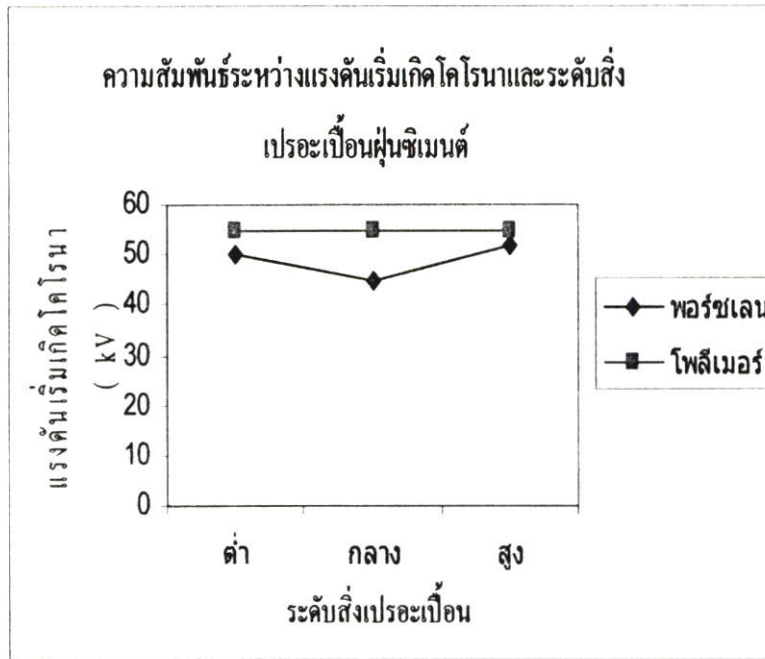
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วย  
โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ



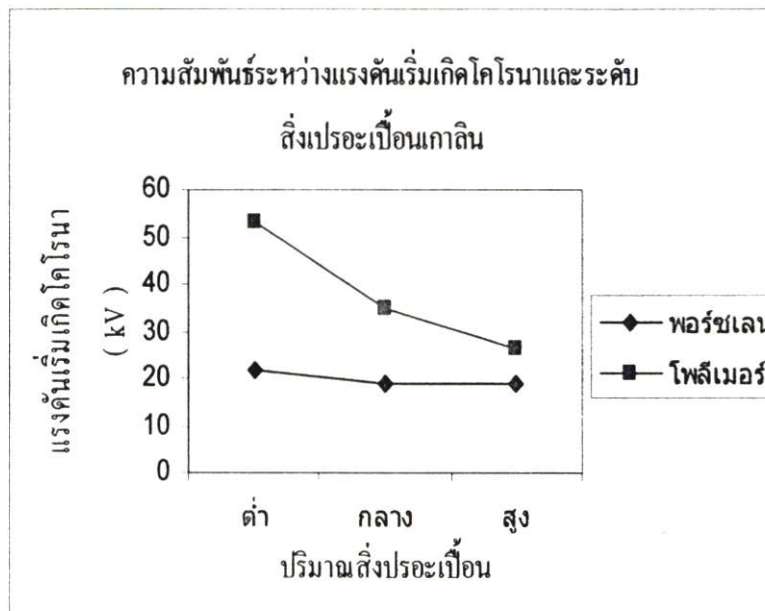
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ชเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประกอบแป้ง



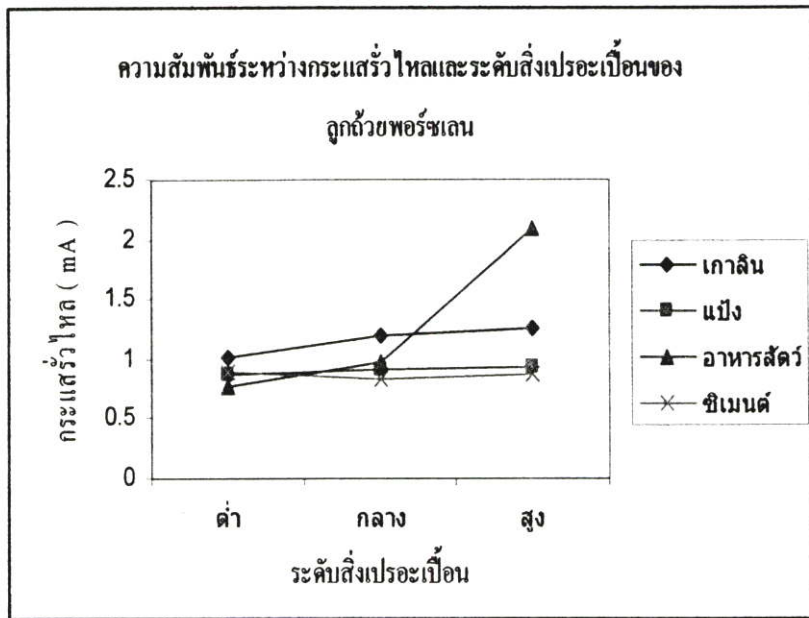
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ชเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประกอบอาหารสัตว์



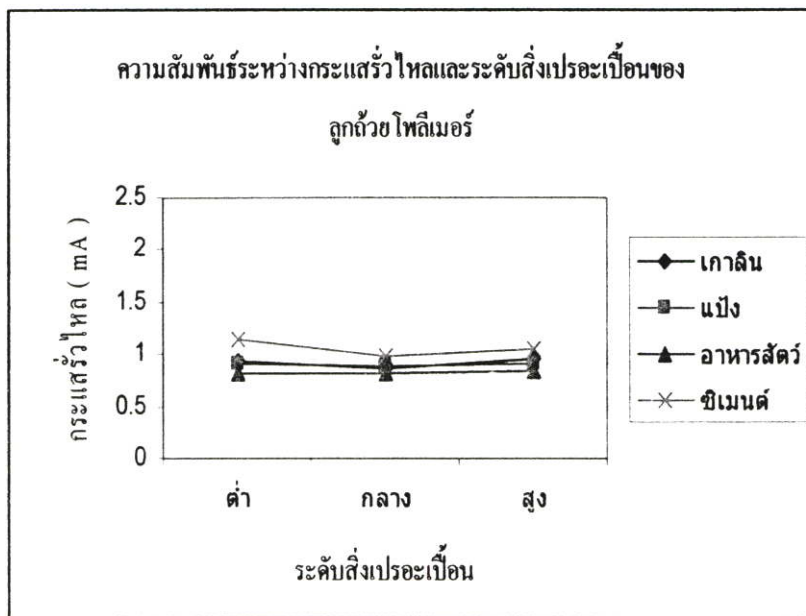
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นปูน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนกาลิน



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนภายใต้สภาวะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปื้อนฝุ่นชนิดต่าง ๆ

จากผลการทดลองตาม ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 พบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อระดับสิ่งเปื้อนของฝุ่นที่นำมาทดสอบคือ แป้งข้าวโพด ฝุ่นอาหารสัตว์ ฝุ่นซิเมนต์ และฝุ่นเกาลินเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนภายใต้สิ่งเปื้อนฝุ่นแป้งข้าวโพดและฝุ่นซิเมนต์ สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้สิ่งเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์และเกาลิน จากผลการทดลอง การที่แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนภายใต้สิ่งเปื้อนฝุ่นแป้งข้าวโพดและฝุ่นซิเมนต์ สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้สิ่งเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์และเกาลินนั้น จากการสังเกตเบื้องต้นในตารางที่ 3.4 บทที่ 3 พบว่า ปริมาณไคเฟอร์สไตรออกไซด์ (  $Fe_2O_3$  ) ที่มีอยู่ในฝุ่นแป้งและซิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกันและมีปริมาณมากกว่าปริมาณไคเฟอร์สไตรออกไซด์ (  $Fe_2O_3$  ) ที่มีอยู่ในฝุ่นอาหารสัตว์และเกาลิน ซึ่งปริมาณสารประกอบดังกล่าวจะมีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลน นอกจากนี้พบว่าระดับสิ่งเปื้อนของฝุ่นที่นำมาทดสอบไม่ได้มีผลต่อแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลน

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 พบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อระดับสิ่งเปื้อนของฝุ่นแป้งข้าวโพด ฝุ่นซิเมนต์ เพิ่มขึ้นในขณะที่แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับสิ่งเปื้อนของฝุ่นอาหารสัตว์และฝุ่นเกาลินเพิ่มขึ้น จากผลที่เป็นเช่นนั้น พบว่า น่าจะมาจากปัจจัยปริมาณของสารประกอบไคเฟอร์สไตรออกไซด์ (  $Fe_2O_3$  ) ที่มีอยู่ในฝุ่นผงที่นำมาทดสอบและชนิดของของฉนวนโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบ นอกจากนี้พบว่า ระดับสิ่งเปื้อนของฝุ่นอาหารสัตว์และเกาลินที่นำมาทดสอบมีผลต่อแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์

ในรูปที่ 4.11 พบว่า ระดับสิ่งเปื้อนอาหารสัตว์และเกาลินมีผลต่อกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลน

ในรูป 4.7 ถึง 4.10 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์เมื่อระดับสิ่งเปื้อนฝุ่นแป้งและฝุ่นซิเมนต์เพิ่มขึ้น มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันใช้งานของระบบ 33 kV ( แรงดันเฟส 19 kV ) และค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อระดับสิ่งเปื้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนเมื่อระดับสิ่งเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์และเกาลินเพิ่มขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันแรงดันใช้งานของระบบ 33 kV ( แรงดันเฟส 19 kV ) และแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์เมื่อระดับสิ่งเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์และเกาลินเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มลดลง จากผลดังกล่าวจะเห็นว่าลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบ สามารถนำไปใช้งานได้ในสภาพมลภาวะเปื้อนฝุ่นแป้งและซิเมนต์ ลูกถ้วยพอร์ซเลนไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานบริเวณที่มีมลภาวะฝุ่นอาหารสัตว์ ในทุกระดับของความเปื้อน สำหรับลูกถ้วยโพลีเมอร์นั้น สามารถนำไปใช้งานได้ในกรณีที่ระดับสิ่งเปื้อนต่ำและปานกลาง โดยยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้

กับระดับความเปรอะเปื้อนสูง อย่างไรก็ตามควรดำเนินการทดสอบวาวไฟตามผิวลูกถ้วยตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงที่ทดสอบก่อนนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ พบว่า จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.10 พบว่ารูปที่ 4.7 จะให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 4.9 ทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.8 จะให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 4.10 แสดงว่า การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สามารถจำลองการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะฝุ่นผงในประเทศไทยได้บางกรณีเท่านั้น เช่นกรณีของฝุ่นอาหารสัตว์ เป็นต้น

#### 4.6 การทดสอบลูกถ้วยสะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test )

การทดสอบการทดสอบลูกถ้วยสะอาดด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะหมอกจำลอง เพื่อต้องการศึกษาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์สะอาดเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ ดำเนินการได้โดยจัดเตรียมวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.2 และทำการควบคุมความดันเครื่องกำเนิดไอน้ำอยู่ที่ประมาณ 10 Psi ( ปอนด์ / ตารางนิ้ว ) แล้วให้ปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. ทำการป้อนแรงดันให้กับพวงลูกถ้วย เริ่มตั้งแต่ 0 kV จนถึงแรงดันที่ 19 kV ( แรงดันเฟสของระบบ 33 kV )
2. ที่ระดับ แรงดัน 19 kV ใช้กล้องส่องโคโรนาตรวจจับลูกถ้วยว่าเกิดโคโรนาหรือไม่ ( โดยคงแรงดันไว้ที่ประมาณ 5 นาที ) ถ้าไม่เกิดให้ดำเนินการตามข้อ 3
3. เปิดวาล์วจ่ายไอน้ำจากหม้อต้ม จากนั้น ใช้กล้องโคโรนาตรวจจับ กรณีที่เกิดโคโรนาให้บันทึกค่ากระแสรั่วไหล แล้วลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์ กรณีที่ไม่เกิดโคโรนาให้เพิ่มแรงดันครั้งละ 2-5 kV จนกระทั่งเกิดโคโรนา บันทึกค่ากระแสรั่วไหล แล้วลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์ การเพิ่มแรงดันทดสอบ เพิ่มได้สูงสุดไม่เกิน 55 kV เพื่อเป็นการรักษาสภาพของหม้อแปลงทดสอบ
4. ทำการกราวด์ ปิดวาล์วจ่ายไอน้ำ เปิดกระโจມและระบายอากาศ เปลี่ยนลูกถ้วยทดสอบลูกถัดไป โดยที่ลูกถ้วยแต่ละชุด จะทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้ง

#### 4.7 ผลการทดลองของลูกถ้วยสะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ( Clean Fog Test )

ผลการทดลองลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์สะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง ตามการทดลอง หัวข้อ 4.6 แสดงในตารางที่ 4.5, 4.6 และรูปที่ 4.13, 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์สะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

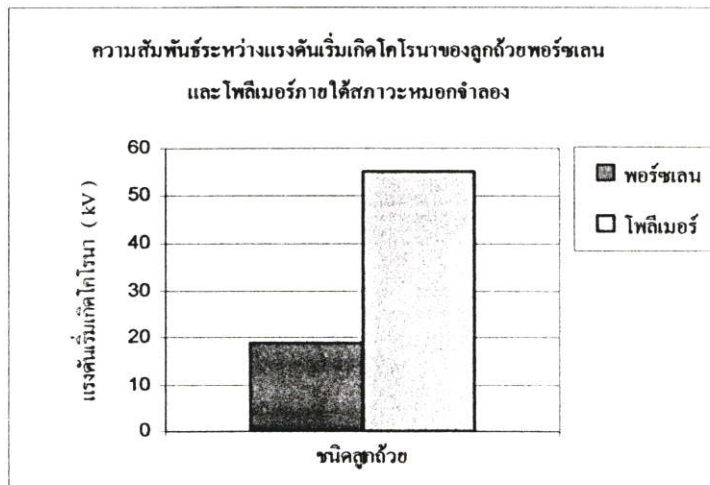
ระดับความ เปรอะเปื้อน	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV )	
	ลูกถ้วยพอร์ซเลน	ลูกถ้วยโพลีเมอร์
ลูกถ้วยสะอาด	19.0	55.0

**หมายเหตุ** ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของลูกถ้วย 3 ชุด

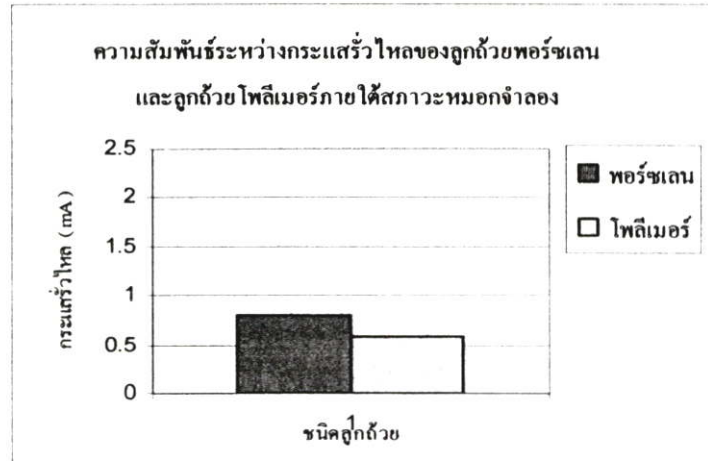
ตารางที่ 4.6 กระแสรั่วไหล ( mA ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและโพลีเมอร์สะอาดภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

ระดับความ เปรอะเปื้อน	กระแสรั่วไหล ( mA )	
	ลูกถ้วยพอร์ซเลน	ลูกถ้วยโพลีเมอร์
ลูกถ้วยสะอาด	0.8	0.6

**หมายเหตุ** ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของลูกถ้วย 3 ชุด

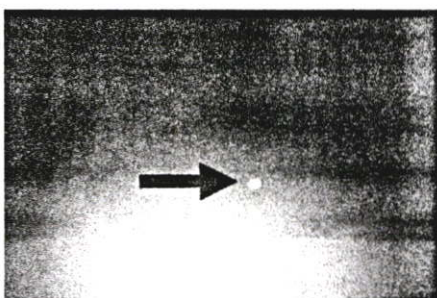


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ( kV ) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

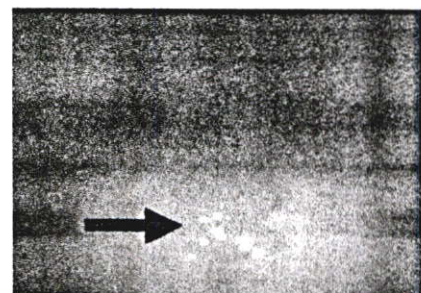


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล (mA) ของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

จากผลการทดลอง ตารางที่ 4.5, 4.6 และรูปที่ 4.13 4.14 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนภายใต้สภาวะหมอกจำลอง มีค่าต่ำกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยโพลีเมอร์มีค่าน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลน แสดงว่าความชื้นมีผลต่อแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนสะอาด จากผลดังกล่าว ลูกถ้วยโพลีเมอร์มีความเหมาะสมในการติดตั้งใช้งาน ในบริเวณที่มีหมอกจัดตอนเช้า ในบริเวณที่มีอากาศชื้นสูงในฤดูหนาว เนื่องจากแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาสูงกว่าลูกถ้วยพอร์ซเลนซึ่งทำให้การเกิดควาบไฟตามผิวเกิดได้ยากขึ้น



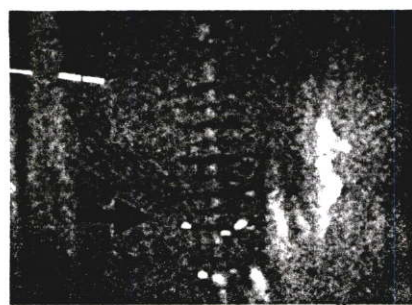
(ก) ลูกถ้วยพอร์ซเลนเปราะเปื้อนไอเกลือ  
ที่แรงดัน 63 kV



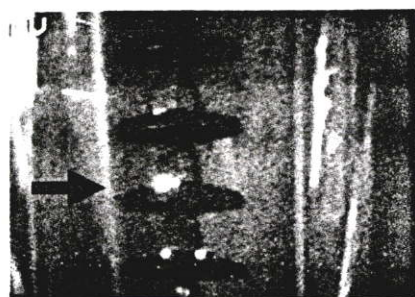
(ข) ลูกถ้วยโพลีเมอร์เปราะเปื้อนไอเกลือ  
ที่แรงดัน 49 kV



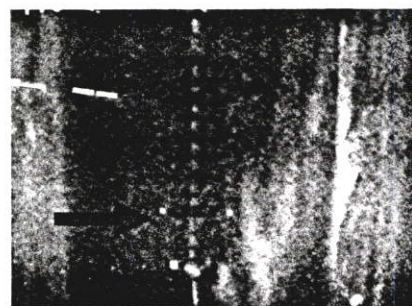
( ค ) ลูกถ้วยพอร์ซเลนเปราะเป็นอนุ  
แป้ง ที่แรงดัน 46 kV



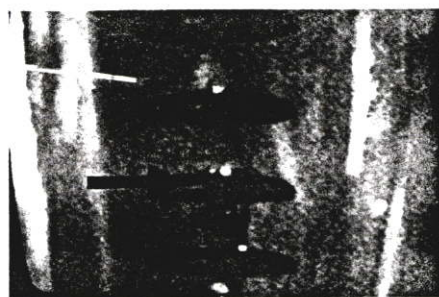
( ง ) ลูกถ้วยโพลีเมอร์เปราะเป็นอนุ  
แป้ง ที่แรงดัน 53 kV



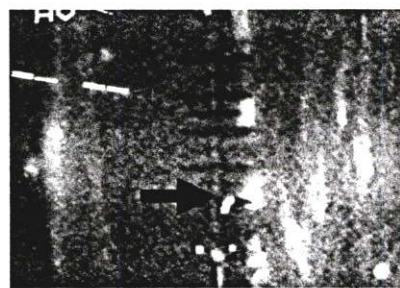
( จ ) ลูกถ้วยพอร์ซเลนเปราะเป็นอนุ  
อาหารสัตว์ ที่แรงดัน 21 kV



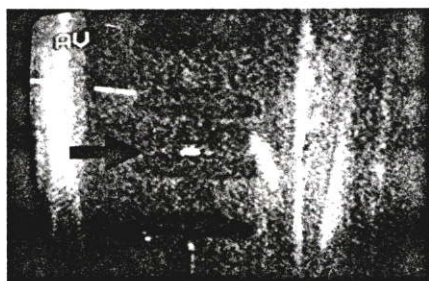
( ฉ ) ลูกถ้วยโพลีเมอร์เปราะเป็นอนุ  
อาหารสัตว์ ที่แรงดัน 45 kV



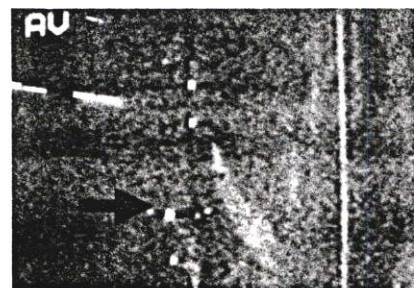
( ช ) ลูกถ้วยพอร์ซเลนเปราะเป็นอนุ  
ซีเมนต์ ที่แรงดัน 50 kV



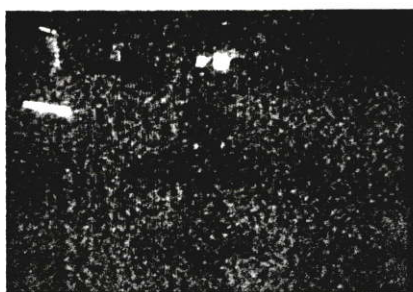
( ซ ) ลูกถ้วยโพลีเมอร์เปราะเป็นอนุ  
ซีเมนต์ ที่แรงดัน 55 kV



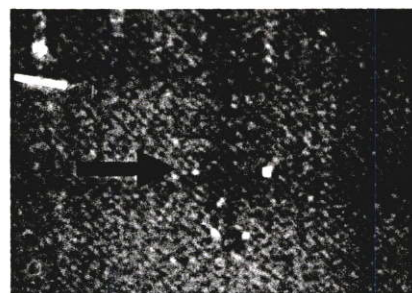
( ญ ) ลูกถ้วยพอร์ซเลนเปราะเป็นกา  
ลีน ที่แรงดัน 19 kV



( ฎ ) ลูกถ้วยโพลีเมอร์เปราะเป็นกา  
ลีน ที่แรงดัน 34 kV



( ก ) ลูกถ้วยพอร์ซเลนสะอาดภายใต้สภาวะ  
หมอกจำลอง ที่แรงดัน 19 kV



( ข ) ลูกถ้วยพอลิเมอร์สะอาดภายใต้สภาวะ  
หมอกจำลอง ที่แรงดัน 55 kV

**รูปที่ 4.15** ลักษณะการเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยพอลิเมอร์ภายใต้  
สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือและฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ

#### 4.8 การวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยพอลิเมอร์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง

##### ( Insulation Resistance )

การวัดค่าความต้านทานฉนวนของลูกถ้วยพอลิเมอร์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง เพื่อ  
ต้องการศึกษาค่าความต้านทานฉนวนของลูกถ้วยพอลิเมอร์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงชนิด  
ต่าง ๆ ได้แก่ เกลือจากสารละลายเกลือ ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ฝุ่นซิเมนต์ และเกาติน ตามลำดับ  
สำหรับขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานฉนวนสามารถดำเนินการดังนี้

1. หลังจากเตรียมตัวอย่างสำหรับ การวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะ  
เปรอะเปื้อนฝุ่นผง ตามหัวข้อ 3.11 บทที่ 3 แล้ว โดยมีกรณีศึกษาจำนวน 6 กรณี กรณีละ  
6 ตัวอย่าง ได้แก่ ฉนวนพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะไอเกลือเล็กน้อย ไอเกลือปานกลาง และ  
ไอเกลือมาก ฉนวนพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นแป้ง ฝุ่นปูนและฝุ่นอาหารสัตว์  
ตามลำดับ จากนั้น ทำการวัดค่าความต้านทานฉนวนแต่ละตัว บันทึกค่าเป็นค่าเริ่มต้น  
สำหรับวันแรก
2. แบ่งตัวอย่างแต่ละกรณีศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่หนึ่ง ถูกควบคุมเงื่อนไขอยู่ภายใต้  
อุณหภูมิ 30 °C ( อุณหภูมิเฉลี่ยใช้งานในประเทศไทย ) และกลุ่มที่สอง ถูกควบคุมเงื่อนไข  
อยู่ภายใต้อุณหภูมิ 50 °C ( อุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อเปรียบเทียบ ) เป็นเวลา 8 ชั่วโมงทุกวัน  
และดำเนินการเป็นเวลา 15 วัน ซึ่งมีการวัดค่าความต้านทานฉนวนทุกครั้งหลังจากมีการ  
ควบคุมอุณหภูมิครบ 8 ชั่วโมงแต่ละวันพร้อมบันทึกผล

#### 4.9 ผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะประะเป็อน ฝุ่นผง ( Insulation Resistance )

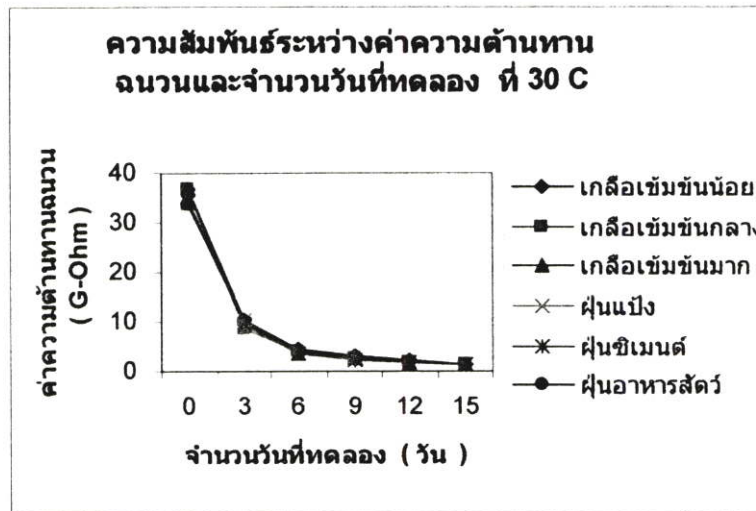
ผลการวัดค่าความต้านทานฉนวน ตามการทดลองหัวข้อ 4.8 สามารถแสดงในตาราง 4.7, 4.8 และรูป 4.16 , 4.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานฉนวนหน่วย G-Ohm ( Insulation Resistance ) ของลูกถ้วย  
โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประะเป็อนฝุ่นผงที่อุณหภูมิ 30 °C

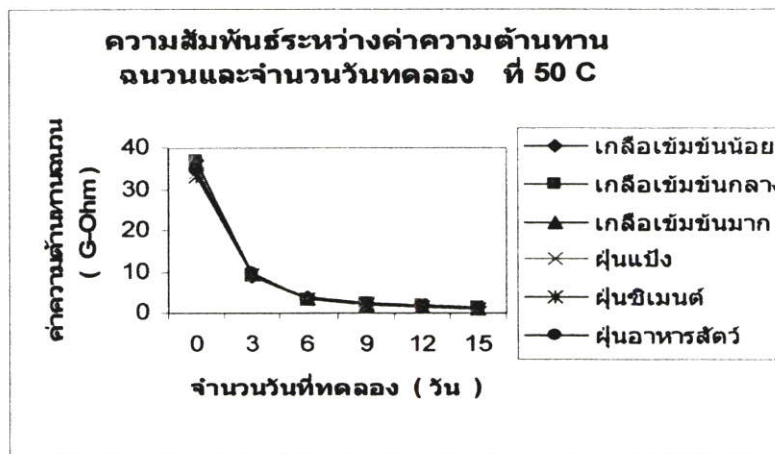
ชนิดสิ่งประะเป็อน	วันที่ ณ อุณหภูมิ 30 °C					
	0	3	6	9	12	15
เกลือเข้มข้นน้อย	37.0	10.5	4.7	3	2.2	1.4
เกลือเข้มข้นกลาง	37.0	8.7	4.1	2.7	2.01	1.33
เกลือเข้มข้นมาก	37.0	9.6	3.8	2.51	1.86	1.22
ฝุ่นแป้ง	34.0	10.4	3.8	2.49	1.84	1.19
ฝุ่นซีเมนต์	34.5	9.4	3.8	2.48	1.82	1.16
ฝุ่นอาหารสัตว์	33.7	10.0	4.3	2.75	1.98	1.21

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานฉนวนหน่วย G-Ohm ( Insulation Resistance ) ของลูกถ้วย  
โพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประะเป็อนฝุ่นผงที่อุณหภูมิ 50 °C

ชนิดสิ่งประะเป็อน	วันที่ ณ อุณหภูมิ 50 °C					
	0	3	6	9	12	15
เกลือเข้มข้นน้อย	37.2	8.8	3.8	2.65	2.08	1.51
เกลือเข้มข้นกลาง	37.1	8.6	3.6	2.41	1.82	1.23
เกลือเข้มข้นมาก	36.6	9.8	3.4	2.19	1.59	0.99
ฝุ่นแป้ง	34.3	9.2	3.4	2.2	1.6	1.01
ฝุ่นซีเมนต์	33.4	9.2	3.3	2.13	1.55	0.97
ฝุ่นอาหารสัตว์	34.8	10	3.5	2.26	1.64	1.03



**รูปที่ 4.16** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวน ( G-Ohm ) และจำนวนวันที่ทำการทดลองของตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะแปรอะเปื้อนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 °C



**รูปที่ 4.17** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวน ( G-Ohm ) และจำนวนวันที่ทำการทดลองของตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะแปรอะเปื้อนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C

จากผลการทดลอง ตารางที่ 4.7 และ 4.8 และรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่า ความต้านทานฉนวนของฉนวนโพลีเมอร์ ( ความต้านทานของผิวฉนวนและเนื้อฉนวน ) ในสภาวะแปรอะเปื้อนฝุ่นทดสอบชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เลื้อยเข้มน้ยนอย เลื้อยเข้มน้ยนกลาง และเลื้อยเข้มน้ยนมาก รวมทั้ง ฝุ่นแป้ง ฝุ่นซ้มนนต ฝุ่นอาหารส้ตว มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วใน

สามวันแรก และมีค่าค่อย ๆ ลดลงต่อเนื่องในวันต่อมาจนกระทั่งถึงวันที่ 15 นอกจากนี้ ความต้านทานจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนที่อุณหภูมิ 50 °C ต่ำกว่า ความต้านทานจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนที่อุณหภูมิ 30 °C เล็กน้อย แสดงว่า ชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อนที่นำมาทดสอบซึ่งจับเกาะบนผิวจนวนมีผลทำให้ค่าความต้านทานจนวนโพลีเมอร์มีค่าลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะเกลือจากสารละลายเกลือและส่วนประกอบที่มีอยู่ในฝุ่นผงแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบ ที่ทำให้เกิดผลดังกล่าว

#### 4.10 การตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวจนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope : SEM )

##### จุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope : SEM )

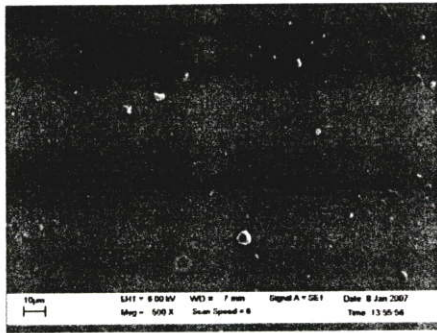
การตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวจนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อต้องการศึกษาลักษณะการจับเกาะของฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เกลือจากสารละลายเกลือ ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ฝุ่นซิเมนต์ และเกาหิน ตามลำดับบนผิวลูกถ้วยโพลีเมอร์ สำหรับขั้นตอนการตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดำเนินการดังนี้

1. หลังจากเตรียมตัวอย่างสำหรับการตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง บนผิวจนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตามหัวข้อ 3.11 บทที่ 3 แล้ว โดยมีจำนวน 6 ตัวอย่างตามสภาวะเปรอะเปื้อน 6 ชนิดในวันแรก และจำนวน 6 ตัวอย่างตามสภาวะเปรอะเปื้อน 6 ชนิดในวันที่ 15 ที่อุณหภูมิ 30 °C และจำนวน 6 ตัวอย่างตามสภาวะเปรอะเปื้อน 6 ชนิดในวันที่ 15 ที่อุณหภูมิ 50 °C ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดมาตัดให้มีขนาดกว้างและยาวไม่เกิน 1.0 เซนติเมตร และหนาไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างทั้งหมดไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้กำลังขยายขนาด 500 เท่า ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ สามารถปรับกำลังขยายได้หลายระดับเป็นจำนวนเท่า ( x ) เช่น 50 x, 500x, 1000x, 2000x

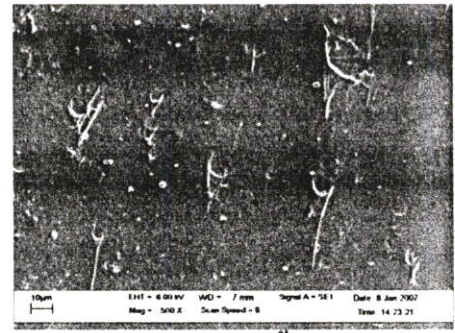
#### 4.11 ผลการตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงบนผิวจนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope : SEM )

##### จุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( Scanned Electron Microscope : SEM )

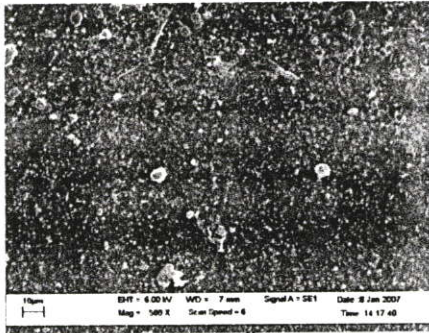
ผลการตรวจลักษณะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ บนผิวจนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตามหัวข้อ 4.10 สามารถแสดงได้ดังรูป 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



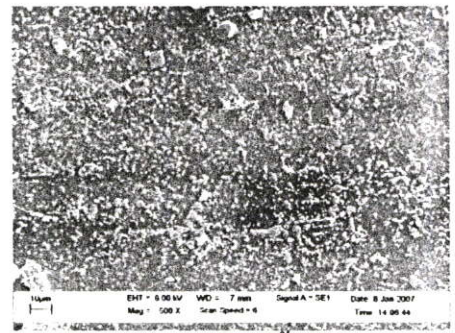
(ก) ตัวอย่างผิวฉนวนสะอาด



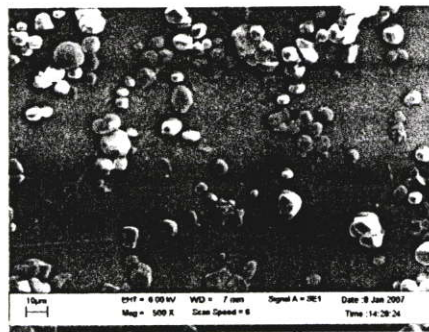
(ข) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือเล็กน้อย



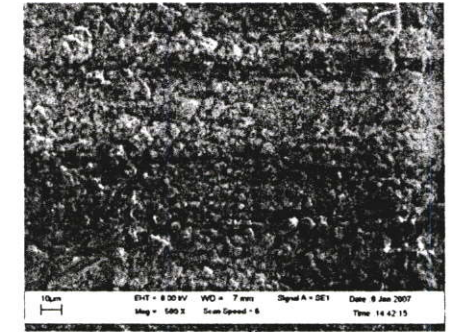
(ค) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือปานกลาง



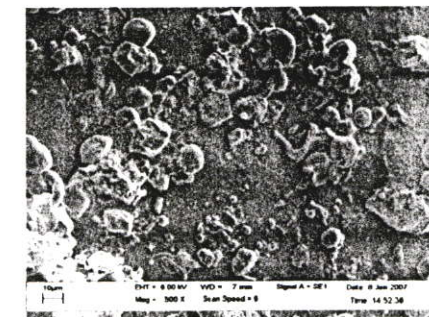
(ง) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือมาก



(จ) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนฝุ่นแป้ง

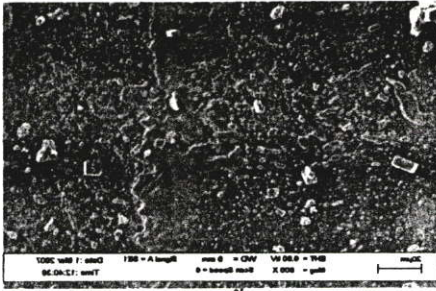


(ฉ) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนฝุ่นซิเมนต์

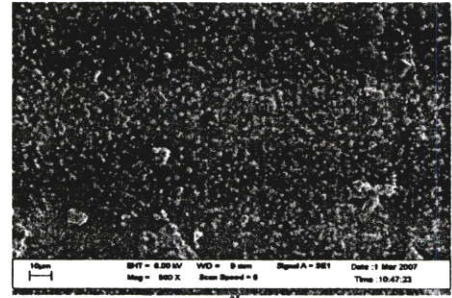


(ช) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์

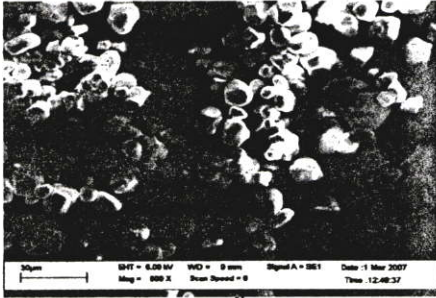
รูปที่ 4.18 ผลการตรวจลักษณะสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สถานะเปรอะเปื้อนต่างๆ วันแรกของการทดลอง กำลังขยาย 500 เท่า



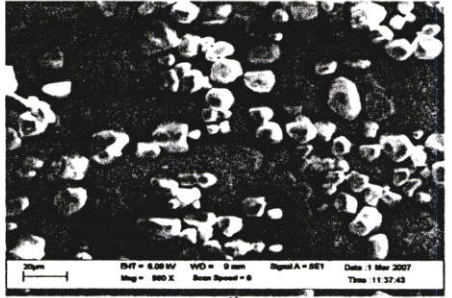
(ก) ผิวฉนวนประอะเป็อนเกลือมาก 30 °C



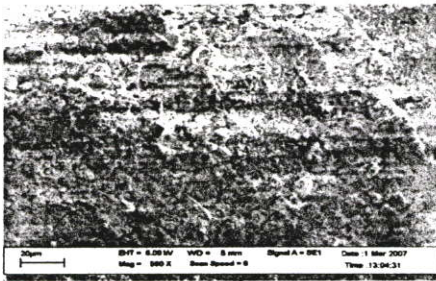
(ข) ผิวฉนวนประอะเป็อนเกลือมาก 50 °C



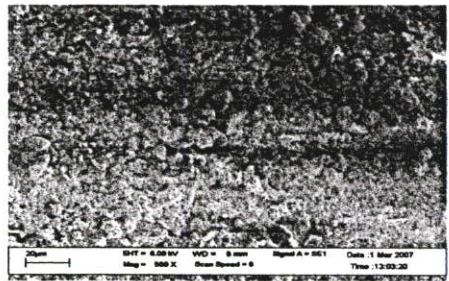
(ค) ผิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นเป็อง 30 °C



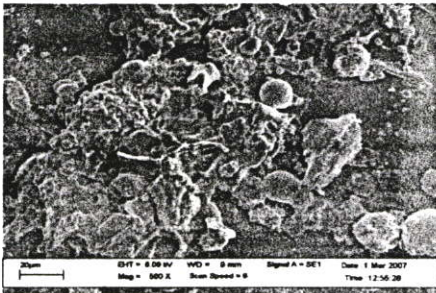
(ง) ผิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นเป็อง 50 °C



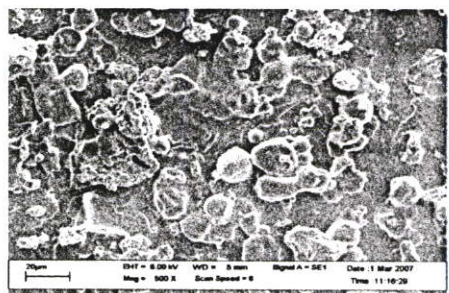
(จ) ผิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นซิเมนต์ 30 °C



(ฉ) ผิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นซิเมนต์ 50 °C



(ช) ผิวฉนวนประอะเป็อนอาหารสัตว์ 30 °C



(ซ) ผิวฉนวนประอะเป็อนอาหารสัตว์ 50 °C

รูปที่ 4.19 ผลการตรวจลักษณะสิ่งประอะเป็อนบนผิวฉนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะประอะเป็อนต่าง ๆ วันที่ 15 ของการทดลอง เปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 °C และ 50 °C ตามลำดับ กำลังขยาย 500 เท่า

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 พบว่า ลักษณะสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวน ตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ สภาวะเปราะเปื้อนต่าง ๆ มีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของสิ่งเปราะเปื้อน กล่าวคือ ผิวฉนวนโพลีเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้สิ่งเปราะเปื้อนสารละลายเกลือจะมีความหนาแน่นของเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายเกลือ ส่วนผิวฉนวนโพลีเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้สิ่งเปราะเปื้อนที่เป็นฝุ่นแป้งและฝุ่นอาหารสัตว์การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนจะเป็นกลุ่ม ๆ และจะเห็นส่วนที่เป็นผิวฉนวน ในขณะที่ผิวฉนวนโพลีเมอร์ที่เปราะเปื้อนซิเมนต์จะปกคลุมทั่วผิวฉนวนทั้งหมด แสดงว่าฉนวนโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติในการจับเกาะสิ่งเปราะเปื้อนแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบ ลักษณะสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ชนิดสิ่งเปราะเปื้อนเดียวกัน ในวันแรก วันที่ 15 ของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 30 ° C และวันที่ 15 ของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 50 ° C ตามลำดับ พบว่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าอุณหภูมิไม่ได้มีผลต่อการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนมากนัก

#### 4.12 การทดสอบการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อน ฝุ่นผง ( Hydrophobic )

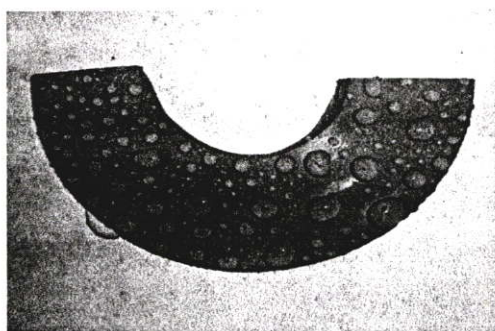
การทดสอบการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง เพื่อต้องการศึกษา คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อน ฝุ่นผง ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เกลือจากสารละลายเกลือ ฝุ่นแป้ง ฝุ่นอาหารสัตว์ฝุ่นซิเมนต์ และ เกลือตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการทดสอบการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยฉนวนโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง ดำเนินการได้ดังนี้

1. หลังจากเตรียมตัวอย่างฉนวนโพลีเมอร์สำหรับการทดสอบการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง ในหัวข้อ 3.11 ในบทที่ 3 แล้ว โดยมีตัวอย่างฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ จำนวน 12 ตัวอย่าง แบ่งกรณีศึกษาจำนวน 6 กรณี กรณีละ 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะไอเกลืออ่อน ไอเกลือปานกลางและไอเกลือมาก ฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นแป้ง ฝุ่นปูนและฝุ่นอาหารสัตว์ตามลำดับ จากนั้นทำการฉีดน้ำฝอยบนฉนวนแต่ละตัว แล้วดูผลพร้อมบันทึกภาพเริ่มต้นสำหรับวันแรก

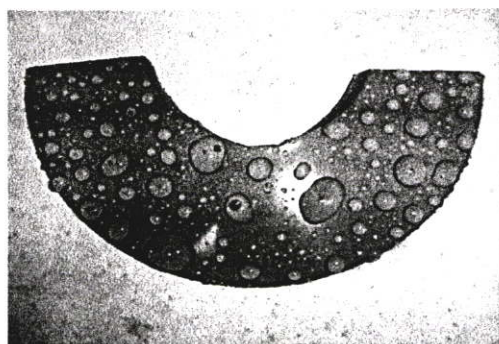
2. แบ่งตัวอย่างแต่ละกรณีศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งเอาไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 ° C และอีกกลุ่ม เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 50 ° C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงทุกวัน และดำเนินการเป็นเวลา 15 วัน หลังจากครบ 15 วันแล้ว ฉีดน้ำฝอยบนฉนวนแต่ละตัวอย่าง พร้อมบันทึกผลและเปรียบเทียบกับวันแรก

#### 4.13 ผลการทดสอบการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะ เปรอะเปื้อนฝุ่นผง ( Hydrophobic )

ผลการตรวจลักษณะการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน  
ฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ ตามการทดลองในหัวข้อ 4.12 สามารถแสดงได้ดังรูป 4.20

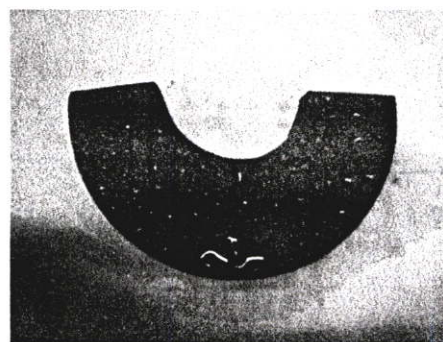


( ก ) ผิวฉนวนสะอาด ( HC 1 )



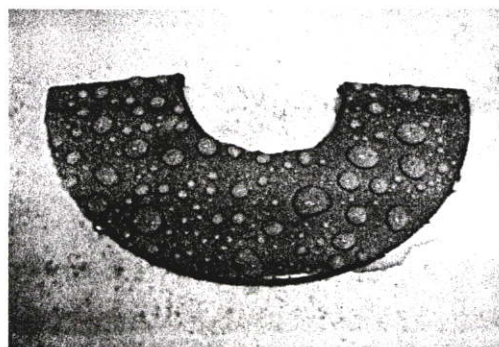
( ข ) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือเล็กน้อยวันแรก

( HC 2 )



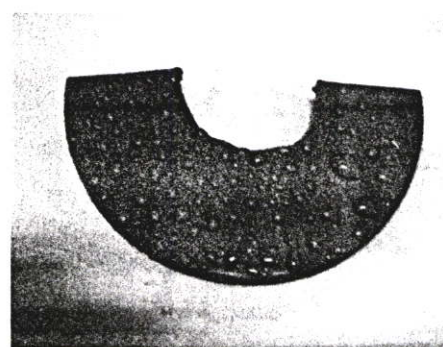
( ค ) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือเล็กน้อย วันที่ 15

( HC 2 )



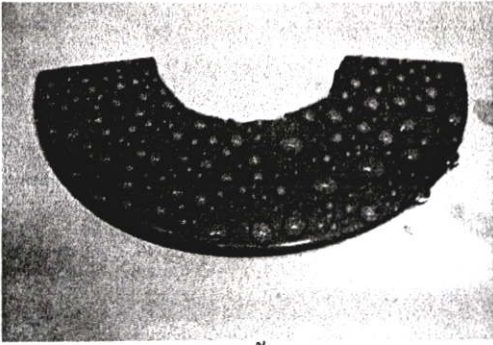
( ง ) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือปานกลาง

วันแรก ( HC 2 )



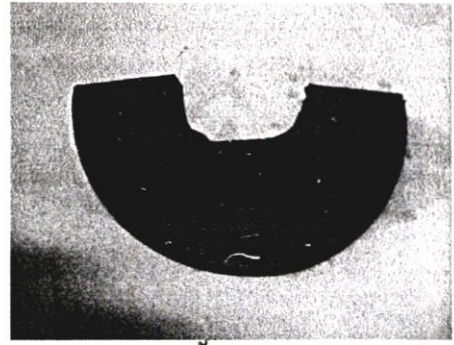
( จ ) ผิวฉนวนเปรอะเปื้อนเกลือปานกลาง

วันที่ 15 ( HC 2 )



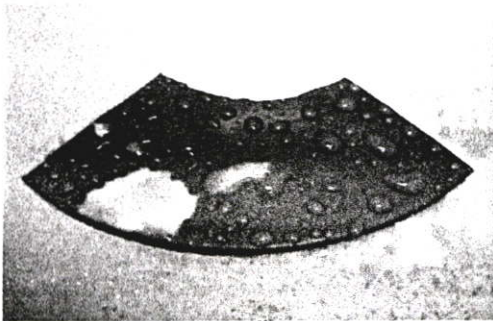
(จ) ศิวฉนวนประอะเป็อนเกลือมากวันแรก

(HC 2)



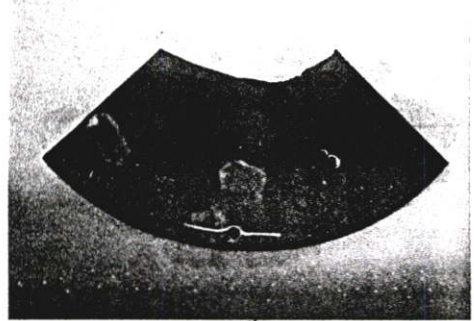
(ข) ศิวฉนวนประอะเป็อนเกลือมาก วันที่15

(HC 2)



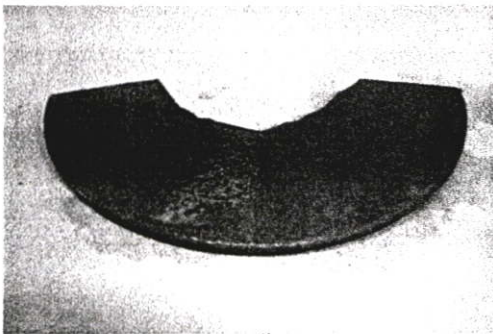
(ค) ศิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นแป้ง วันแรก

(HC 4)



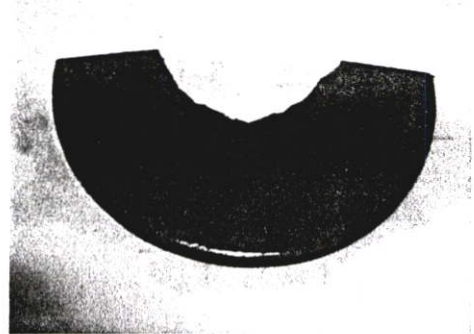
(ง) ศิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นแป้ง วันที่15

(HC 4)



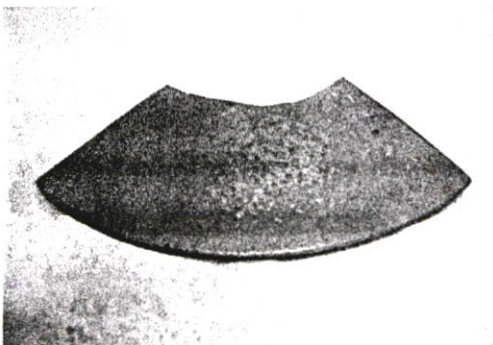
(ฉ) ศิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นปูนซิเมนต์ วันแรก

(HC 6)



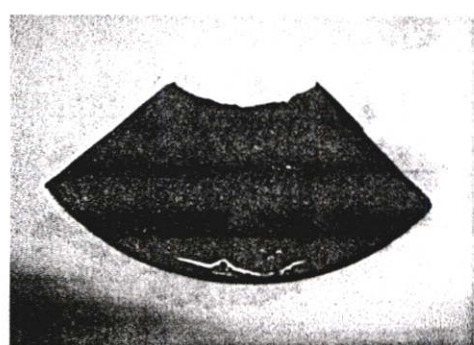
(ช) ศิวฉนวนประอะเป็อนฝุ่นปูนซิเมนต์วันที่15

(HC 6)



(ฉ) ศิวฉนวนประอะเป็อนอาหารสัตว์ วันแรก

(HC 6)



(จ) ศิวฉนวนประอะเป็อนอาหารสัตว์ วันที่15

(HC 6)

**รูปที่ 4.20** ผลการตรวจคุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะสิ่งเปราะเปื้อนต่าง ๆ เปรียบเทียบ ระหว่างวันแรกและวันที่ 15 ของการทดลอง ค่าในวงเล็บเป็นการเปรียบเทียบกับค่าการแบ่งระดับการเป็นหยดน้ำ ( Hydrophobic ) ตามมาตรฐาน STRI ประเทศสวีเดน สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ค ท้ายเล่ม

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.20 ( ก ) - ( ช ) พบว่า คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของลูกถ้วยโพลีเมอร์ผิวสะอาดเมื่อเทียบกับมาตรฐานการแบ่งระดับการเป็นหยดน้ำ จัดอยู่ในระดับที่ 1 ( HC1 ) คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนเกลือเล็กน้อย ระหว่างวันแรกและวันที่ 15 มีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับมาตรฐานการแบ่งระดับการเป็นหยดน้ำ จัดอยู่ในระดับที่ 2 ( HC 2 ) ส่วนคุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนเกลือปานกลางและเกลือมากระหว่างวันแรกและวันที่ 15 มีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับมาตรฐานการแบ่งระดับการเป็นหยดน้ำ จัดอยู่ในระดับที่ 2 ( HC 2 ) เช่นกัน

ในรูปที่ 4.20 ( ช ) - ( ฉ ) พบว่า คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นแป้ง สูญเสียไปโดยเฉาะบริเวณที่มีสิ่งเปราะเปื้อนฝุ่นแป้ง ในขณะที่คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำบริเวณอื่นยังมีอยู่ เมื่อเทียบกับมาตรฐานการแบ่งระดับการเป็นหยดน้ำ จัดอยู่ในระดับที่ 4 ( HC 4 )

ในรูปที่ 4.20 ( ฉ ) - ( จ ) พบว่า คุณสมบัติการเป็นหยดน้ำของลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นซิเมนต์และฝุ่นอาหารสัตว์ สูญเสียตลอดทั่วผิวฉนวนที่เปราะเปื้อนด้วยฝุ่นผงดังกล่าว เมื่อเทียบกับมาตรฐานการแบ่งระดับการเป็นหยดน้ำ จัดอยู่ในระดับที่ 6 ( HC 6 )

จากลักษณะที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นว่า การเกิดการจับเกาะเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สิ่งเปราะเปื้อนของฝุ่นที่นำมาทดสอบแตกต่างกัน กล่าวคือ ผิวฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะสารละลายเกลือเข้มข้นต่าง ๆ กัน ยังคงสภาพการเกาะเป็นหยดน้ำอยู่ได้ ลักษณะดังกล่าว ทำให้โอกาสที่เกิดความต่อเนื่องของสารละลายน้อยกว่าผิวฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะฝุ่นแป้งที่ยังคงสภาพการจับเกาะเป็นหยดน้ำอยู่บางส่วนของผิวฉนวน ในขณะที่ความต่อเนื่องของสารละลายบนผิวฉนวนภายใต้ฝุ่นอาหารสัตว์และซิเมนต์ มีความต่อเนื่องทั่วผิวฉนวน ซึ่งจะก่อให้เกิดการต่อเนื่องของการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลได้ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดความไวตามผิวได้ง่าย การเกิดการจับเกาะเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สิ่งเปราะเปื้อนของฝุ่นที่นำมาทดสอบแตกต่างกัน น่าจะเกิดจากคุณสมบัติของฉนวนโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบ และชนิดของสิ่งเปราะเปื้อนที่นำมาศึกษา

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

#### 5.1.1 การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ

จากผลการทดลองลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ตัวอย่าง ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือ ในหัวข้อ 4.3 ในบทที่ 4 พบว่า จากผลดังกล่าว การใช้งานของลูกถ้วยโพลีเมอร์ตัวอย่าง ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก ถึงแม้ว่าค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา จะสูงกว่าค่าแรงดันใช้งานของระบบ 33 kV ( แรงดันเฟส 19 kV ) เนื่องจากเมื่อระดับความเข้มข้นสารละลายเกลือเพิ่มขึ้น แรงดันเริ่มเกิดโคโรนามีแนวโน้มลดลง ( อย่างไรก็ตามควรดำเนินการทดสอบแฟลชโอเวอร์ลูกถ้วยตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือก่อน เพื่อให้สามารถได้รับข้อมูลครบถ้วนก่อนดำเนินการตัดสินใจเลือกชนิดของลูกถ้วยฉนวนไปใช้งาน )

จากตารางที่ 3.1 บทที่ 3 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำทะเล และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือเข้มข้นปานกลางมีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 4.2 และรูป 4.3 พบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ เมื่ออยู่ภายใต้ น้ำทะเลและสารละลายเกลือเข้มข้นปานกลางผลใกล้เคียงกัน กล่าวคือ แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลนมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยโพลีเมอร์ แสดงว่า ลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนไอเกลือสารละลายเข้มข้นปานกลาง ตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สามารถจำลองการทดสอบการใช้งานของลูกถ้วยภายใต้สภาวะเกลือชายฝั่งทะเลตะวันออกของไทยได้

#### 5.1.2 การทดสอบภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผง

จากผลการทดลองลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ฝุ่นแป้ง ฝุ่นซิเมนต์ ฝุ่นอาหารสัตว์และเกาหิน ในหัวข้อ 4.5 ในบทที่ 4 พบว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์เมื่อระดับสิ่งเปรอะเปื้อนฝุ่นแป้ง และฝุ่นซิเมนต์เพิ่มขึ้น มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันใช้งานของระบบ 33 kV ( แรงดันเฟส 19 kV )

และค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อระดับสิ่งเปื้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลน เมื่อระดับสิ่งเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์และเกาตินเพิ่มขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับระดับแรงดันใช้งานของระบบ 33 kV ( แรงดันเฟส 19 kV ) และแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ เมื่อระดับสิ่งเปื้อนฝุ่นอาหารสัตว์และเกาตินเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มลดลง จากผลดังกล่าว จะเห็นว่าลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ สามารถนำไปใช้งานได้ในสภาพมลภาวะเปื้อนฝุ่นแป้งและซิเมนต์ ลูกถ้วยพอร์ซเลนไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานบริเวณที่มีมลภาวะฝุ่นอาหารสัตว์ ในทุกระดับของความเปื้อน สำหรับลูกถ้วยโพลีเมอร์ตัวอย่างนั้น สามารถนำไปใช้งานได้กรณีที่ระดับสิ่งเปื้อนต่ำและปานกลาง โดยยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระดับความเปื้อนสูง อย่างไรก็ตาม ควรดำเนินการทดสอบวาวไฟตามผิวลูกถ้วยตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลนและลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปื้อนฝุ่นผงที่ทดสอบก่อนนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ พบว่า จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.10 พบว่ารูปที่ 4.7 จะให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 4.9 ทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.8 จะให้ผลใกล้เคียงกับรูปที่ 4.10 แสดงว่า การทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะเปื้อนฝุ่นผงตามมาตรฐาน ไอ อี ซี 507 สามารถจำลองการทดสอบลูกถ้วยภายใต้สภาวะฝุ่นผงในประเทศไทยได้บางกรณีเท่านั้น เช่นกรณีของ ฝุ่นอาหารสัตว์ เป็นต้น

### 5.1.3 การทดสอบภายใต้สภาวะหมอกจำลอง

จากผลการทดลอง หัวข้อ 4.7 บทที่ 4 จะเห็นได้ว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนภายใต้สภาวะหมอกจำลอง มีค่าต่ำกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยโพลีเมอร์ กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยโพลีเมอร์มีค่าน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยพอร์ซเลน แสดงว่าความชื้นมีผลต่อแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยพอร์ซเลนสะอาด จากผลดังกล่าว ลูกถ้วยโพลีเมอร์มีความเหมาะสมในการติดตั้งใช้งาน ในบริเวณที่มีหมอกจัดตอนเช้า ในบริเวณที่มีอากาศชื้นสูงในฤดูหนาว เนื่องจากแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาสูงกว่าลูกถ้วยพอร์ซเลนซึ่งทำให้การเกิดวาวไฟตามผิวเกิดได้ยากขึ้น

### 5.1.4 การวัดค่าความต้านทานฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปื้อนฝุ่นผง

จากผลการทดลอง หัวข้อ 4.9 บทที่ 4 พบว่า ความต้านทานฉนวนของฉนวนโพลีเมอร์ ( ความต้านทานของผิวฉนวนและเนื้อฉนวน ) ในสภาวะเปื้อนฝุ่นทดสอบชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เกลือเข้มข้นน้อย เกลือเข้มข้นปานกลาง และเกลือเข้มข้นมาก รวมทั้ง ฝุ่นแป้ง ฝุ่นซิเมนต์ ฝุ่นอาหารสัตว์ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในสามวันแรก และมีค่าค่อย ๆ ลดลงต่อเนื่อง

ในวันต่อมาจนกระทั่งถึงวันที่ 15 และความต้านทานจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนที่อุณหภูมิ 50 °C ต่ำกว่า ความต้านทานจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนที่อุณหภูมิ 30 °C เล็กน้อย แสดงว่า ชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อนที่นำมาทดสอบซึ่งจับเกาะบนผิวจนวนมีผลทำให้ค่าความต้านทานจนวนโพลีเมอร์มีค่าลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะเกลือจากสารละลายเกลือและส่วนประกอบที่มีอยู่ในฝุ่นผงแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบ ที่ทำให้เกิดผลดังกล่าว นอกจากนี้ อุณหภูมิ ไม่ได้มีผลต่อค่าความต้านทานจนวนของลูกถ้วยโพลีเมอร์ตัวอย่าง ที่อยู่ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนฝุ่นผงต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบ

#### 5.1.5 การตรวจลักษณะผิวจนวนโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( SEM )

จากผลการทดลอง หัวข้อ 4.11 บทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ลักษณะสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวจนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ สภาวะเปรอะเปื้อนต่าง ๆ มีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อน กล่าวคือ ลักษณะการจับเกาะของสารละลายเกลือบนผิวจนวนโพลีเมอร์จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายเกลือ ส่วนผิวจนวนโพลีเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้สิ่งเปรอะเปื้อนที่เป็นฝุ่นแป้งและฝุ่นอาหารสัตว์การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนจะเป็นกลุ่ม ๆ และจะมีที่ว่างบางส่วนบนผิวจนวน ในขณะที่ผิวจนวนโพลีเมอร์ที่เปรอะเปื้อนซิเมนต์จะปกคลุมทั่วผิวจนวนทั้งหมด แสดงว่าจนวนโพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติในการจับเกาะสิ่งเปรอะเปื้อนแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบ ลักษณะสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวจนวนตัวอย่างลูกถ้วยโพลีเมอร์ภายใต้ ชนิดสิ่งเปรอะเปื้อนเดียวกัน ในวันแรก วันที่ 15 ของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 30 °C และวันที่ 15 ของการทดลอง ที่อุณหภูมิ 50 °C ตามลำดับ พบว่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าอุณหภูมิไม่ได้มีผลต่อการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวโพลีเมอร์มากนัก

#### 5.1.6 การศึกษาลักษณะการเกิดหยดน้ำบนผิวจนวนโพลีเมอร์ ( Hydrophobic )

จากผลการทดลอง หัวข้อ 4.13 บทที่ 4 พบว่า การเกิดการจับเกาะเป็นหยดน้ำบนผิวจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สิ่งเปรอะเปื้อนของฝุ่นที่นำมาทดสอบแตกต่างกัน กล่าวคือ ผิวจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะสารละลายเกลือเข้มข้นต่าง ๆ กัน ยังคงสภาพการเกาะเป็นหยดน้ำอยู่ได้ ลักษณะดังกล่าว ทำให้โอกาสที่เกิดความต่อเนื่องของสารละลายน้อยกว่าผิวจนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะฝุ่นแป้งที่ยังคงสภาพการจับเกาะเป็นหยดน้ำอยู่บางส่วนของผิวจนวน ในขณะที่ความต่อเนื่องของสารละลายบนผิวจนวนภายใต้ฝุ่นอาหารสัตว์และซิเมนต์มีความต่อเนื่องทั่วผิวจนวน ซึ่งจะทำให้เกิดการต่อเนื่องของการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลได้ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดแฟลชโอเวอร์ได้ง่าย

การเกิดการจับเกาะเป็นหยคน้ำบนผิวฉนวน โพลีเมอร์ภายใต้สิ่งเปราะเปื้อนของฝุ่น ที่นำมาทดสอบ มีลักษณะแตกต่างกัน น่าจะเกิดจากคุณสมบัติของฉนวน โพลีเมอร์ที่นำมาทดสอบและชนิดของสิ่งเปราะเปื้อนที่นำมาศึกษา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากกระโจมทดสอบที่สร้างขึ้น นอกจากจะใช้ทดสอบลูกถ้วยประเภทต่าง ๆ แล้ว ยังสามารถทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างอื่นได้ด้วย เช่น กับดักล่อฟ้า พีวส์แรงสูง ตลอดจนบุษ ซึ่ง เป็นต้น จึงควรมีการศึกษาอุปกรณ์อื่นดังกล่าว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนในประเทศไทยได้อย่างกว้างขวาง

2. ควรมีการศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อลูกถ้วยกรณีอยู่ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อน โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็นฝุ่นอินทรีย์ เช่น ฝุ่นชนิดอื่น ๆ จากธัญพืช เช่น ฝุ่นแป้งมันสำปะหลัง ฝุ่นแป้งข้าวเจ้า ฝุ่นปลาป่น เป็นต้น และฝุ่นอนินทรีย์ เช่น ฝุ่นโลหะชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

3. ในการศึกษาคุณสมบัติการเป็นหยคน้ำของฉนวนโพลีเมอร์ ( Hydrophobic ) ควรพิจารณาเรื่องความชื้นซึ่งอาจมีผลต่อความสามารถในการซึมซับของผิวฉนวน เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผงชนิดต่าง ๆ

4. การศึกษาคุณสมบัติลูกถ้วยฉนวนโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อน ควรพิจารณาถึงกรณีที่มีการใช้กับสถานีไฟฟ้าย่อยบริเวณที่มีฝุ่นผงเปราะเปื้อนด้วย

5. หลังการทดสอบแต่ละครั้ง ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนไอเกลือหรือทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผง จะต้องทำการระบายอากาศโดยใช้พัดลมระบายอากาศภายในกระโจมทุกครั้ง และรอให้ความชื้นในกระโจมกลับคืนสู่ภาวะเริ่มต้น โดยดูจากเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ( Hygrometer ) จะทำให้ผลการทดสอบมีความถูกต้อง นอกจากนี้ ก่อนการทดสอบแต่ละครั้ง จะต้องแน่ใจว่ากระโจมได้ปิดหมดทุกด้านจนถึงพื้น

6. ชุดจ่ายไอน้ำ สำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนฝุ่นผงควรดำเนินการเทน้ำที่กลั่นตัวเป็นหยคน้ำในท่อทุกครั้ง เพื่อให้การจ่ายไอน้ำผ่านท่อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอสำหรับการทดสอบครั้งต่อไป

7. ลูกถ้วยที่ใช้สำหรับช่องระบายแรงดันเกินของชุดกำเนิดไอน้ำ ไม่ควรขันด้วยเข็มขัดรัด ( clamp ) แน่นจนเกินไป เพราะจะทำให้เมื่อมีแรงดันเกินในชุดกำเนิดไอน้ำ จะไม่สามารถระบายแรงดันเกินได้และอาจทำให้ชุดกำเนิดไอน้ำระเบิดและเป็นอันตรายได้

## เอกสารอ้างอิง

- [ 1 ] พงษ์ศักดิ์ ชินานูญ, วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ. 2549 **ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : บริษัท วิทย์พัฒนา จำกัด.
- [ 2 ] รศ. ประภาณี เกษมศรี ณ อุรุษา, รศ. อำพัน เพ็ญโรจน์, รศ. สอาดศรี กาญจนลัย, รศ. ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์, รศ.มานิตย์ ปัญจมาลา. 2548 **เคมีทั่วไป เล่ม 1** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [ 3 ] ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย การไฟฟ้านครหลวง 2544, **การใช้งานลูกถ้วยภายใต้สภาวะแปรอะเป็อน.**
- [ 4 ] ตำรวจ สังข์สะอาด 2544. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**
- [ 5 ] นรเศรษฐ พัฒนเดช. 2544. “ ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับในระบบ 33 กิโลโวลต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [ 6 ] นรเศรษฐ พัฒนเดช. 2550 **วัสดุฉนวนวิศวกรรม เล่ม 1**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [ 7 ] อมรัชย์ คาร์ว, รศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล, นรเศรษฐ พัฒนเดช และพีรภูมิ ยุทธโกวิท, “ การเปรียบเทียบพฤติกรรมการเกิดโคโรนาและวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยกระแสดลัับและกระแสดตรง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, ประจำปี 2548, ตุลาคม 2548, PW 046, หน้า 429 -431, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [ 8 ] อมรัชย์ คาร์ว. 2549. “ การวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรงโดยพัฒนาจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสดลัับ ” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [ 9 ] IEC Publ. 507, Second Edition 1991-4. “ Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems ” **International Electrotechnical Committee**
- [10] IEC Publ. 815, Second Edition 1986. “Guide for The Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions”. **International Electrotechnical Committee**
- [11] D. Devendranath, Pradeep M. Nirgude, G. V. Rao R.S. Shivakumara Aradhya, A. P. Sudheer, N. S. Mohan Rao , Channakeshava. 1999 “ Investigations on Rain Fog Pollution Test ”. **IEE High Voltage Engineering Symposium. Conference**

Publication No. 467 : 4.111.S25 - 4.114.S25

- [12] Chris S. Engelbrecht, Ralf Hartings, Senior Member IEEE, Helena Tunell,, Bjorn Engstrom, Harald Janssen and Raimund Hennings. 2003. "Pollution Tests for Coastal Conditions on an 800 - kV Composite Bushing". **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 18, No 3. : 953 - 959.
- [13] A. De La O, R. S. Gorur and J.Chang. 1994. "A Clean Fog Test on Non-ceramic Insulating Materials and a Comparison of Porcelain". **IEEE Transactions on Power Delivery** Vol. 9, No. 4. : 1999-2008
- [14] Stephen A. Sebo , Edgar P. Casale, Jose R. Cedeno, Wibawa Tjokrodiponto and Sheikh A. Akbar. 1996 " Review of Features of Fog Chamber at The Ohio State University for Polymer Insulator Evaluation ". **IEEE Annual Report–Conference on Electrical Insulation and Dielectric Dielectric Phenomena.** : 443-446
- [15] X Wang, S.Yoshimura. 1998 "Contamination Performances of Silicone Rubber Subjected to Acid Rain ". **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation** Volume 5 No 6. : 909- 916
- [16] Wibawa Tjokrodiponto , Stephen A. Sebo, John D. Sakich, Tiebin Zhao, 1997 "Simultaneous Electrical and Visual Measurements of Leakage Currents Along Polymer Insulators in Artificial Pollution Tests". **IEEE Preceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials.** 1997. Seoul. Korea : 738- 741
- [17] Anders Eklund, Igor Gutman and Ralf hartings, " Conditioning of Silicone Rubber Insulators : Loss and Recovery of Hydrophobicity" **Ninth International Symposium** September 1, 1995 Graz convention Center, Austria, Europe.
- [18] Ravi S. Gorur, Edward A. Cherney, Jeffrey T. Burnham. **Outdoor Insulators.** Ravi S. Gorur, Inc, Phoenix, Arizona 85044 , 1999
- [19] A. Karn , S. Potivejkul, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, " Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage Between HVAC and HVDC Insulators, **IPEC 2005** , 7<sup>th</sup> International Power Engineering Conference, Marina Mandarin Singapore , TM-3.3, November 29 - December 2, 2005
- [20] Apisit Chaisaengsukkul, Siritwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, " Corona Inception Phenomena of Porcelain Insulators and A Comparison with Polymeric Insulators under Salt Fog Pollution in Thailand ", **ICEE 2007** , Hong Kong. July 2007

- [21] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “ The Study of Ageing of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution in Thailand and A Comparison with Artificial Pollution”, **ICEE 2007**, Hong Kong. July 2007
- [22] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “The Hydrophobic of Polymeric Insulator under Dust Pollution and A Comparison with Artificial Pollution ”, **ECTI 2007** , Thailand . May 2007. pp. 349-352
- [23] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “A Comparison of Corona Phenomena between Porcelain and Polymeric Insulators under Dust Pollution in Thailand d” , **ECTI 2007** , Thailand. May 2007 . pp. 353-356

## ภาคผนวก ก

มาตรฐาน ไอ อี ซี 507 ( IEC 507 Standard )

NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD

9

CEI  
IEC  
507

Deuxième édition  
Second edition  
1991-04

am tube  
Essais sous pollution artificielle des isolateurs  
pour haute tension destinés aux réseaux  
à courant alternatif

Artificial pollution tests on high-voltage  
insulators to be used on a.c. systems

© CEI 1991 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni  
utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procé-  
dé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et  
les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in  
any form or by any means, electronic or mechanical,  
including photocopying and microfilm, without permission  
in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembé Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

U

Pour prix, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue

## CONTENTS

	Page
FOREWORD .....	5
 Clause	
SECTION ONE - GENERAL	
1 Scope .....	7
2 Object .....	7
3 Definitions .....	7
SECTION TWO - GENERAL TEST REQUIREMENTS	
4 Test methods .....	11
5 Arrangement of insulator for test .....	11
6 Requirements for the testing plant .....	13
SECTION THREE - SALT FOG METHOD	
7 Salt solution .....	15
8 Spraying system .....	19
9 Conditions before starting the test .....	21
10 Preconditioning process .....	21
11 Withstand test .....	23
12 Acceptance criterion for the withstand test .....	23
SECTION FOUR - SOLID LAYER METHODS	
13 Composition of the contaminating suspension .....	23
14 Main characteristics of inert materials .....	27
15 Application of the pollution layer .....	29
16 Determination of the degree of pollution of the tested insulator .....	29
17 General requirements for the wetting of the pollution layer .....	31
18 Test procedures .....	33
19 Withstand test and acceptance criterion (common to both Procedures A and B) .....	35
FIGURES .....	36
APPENDIX A - Supplementary information on the assessment of the requirement for the testing plant .....	41
APPENDIX B - Determination of the withstand characteristics of insulators .....	43
APPENDIX C - Measurement of layer conductivity for checking the uniformity of the layer .....	49
APPENDIX D - Additional recommendations concerning the solid layer method procedures ..	53

# INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## ARTIFICIAL POLLUTION TESTS ON HIGH-VOLTAGE INSULATORS TO BE USED ON A.C. SYSTEMS

### FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 36: Insulators.

This second edition of IEC 507 replaces the first edition issued in 1975 which had the status of a technical report.

The text of this standard is based on the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting
36(CO)72	36(CO)75

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the Voting Report indicated in the above table.

The following IEC publications are quoted in this standard:

Publications Nos. 60-1 (1989): High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements.

60-2 (1973): Part 2: Test procedures.

71-1 (1976): Insulation co-ordination. Part 1: Terms, definitions, principles and rules.

# ARTIFICIAL POLLUTION TESTS ON HIGH-VOLTAGE INSULATORS TO BE USED ON A.C. SYSTEMS

## SECTION ONE - GENERAL

### 1 Scope

This standard is applicable for the determination of the power frequency withstand characteristics of ceramic and glass insulators to be used outdoors and exposed to polluted atmospheres, on a.c. systems with the highest voltage of the system ranging from 1 000 V up to 765 kV.

These tests are not directly applicable to greased insulators or to special types of insulators (insulators with conductive glaze or covered with any organic insulating material).

### 2 Object

The object of this standard is to prescribe procedures for artificial pollution tests applicable to insulators for overhead lines, substations and traction lines, and to bushings.

### 3 Definitions

For the purpose of this standard, the following definitions apply.

#### 3.1 Test voltage

The r.m.s. value of the voltage with which the insulator is continuously energized throughout the test.

#### 3.2 Short-circuit current ( $I_{sc}$ ) of the testing plant

The r.m.s. value of the current delivered by the testing plant when the test object is short-circuited at the test voltage.

#### 3.3 Specific creepage distance ( $L_s$ ) of an insulator

The overall creepage distance  $L$  of an insulator divided by the product of the test voltage and  $\sqrt{3}$ ; it is generally expressed in mm/kV.

#### 3.4 Form factor of an insulator ( $F$ )

The form factor is determined from the insulator dimensions. For graphical estimation of the form factor, the reciprocal value of the insulator circumference ( $1/p$ ) is plotted versus the partial creepage distance  $l$  counted from the end of the insulator up to the point reckoned.

The form factor is given by the area under this curve and calculated according to the formula:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)}$$

### 3.5 *Salinity ( $S_a$ )*

The concentration of the solution of salt in tap water, expressed by the amount of salt divided by the volume of solution; it is generally expressed in kg/m<sup>3</sup>.

### 3.6 *Pollution layer*

A conducting electrolytic layer on the insulator surface, composed of salt plus inert materials.

The conductance of the pollution layer on the insulator is measured in accordance with 16.1.

### 3.7 *Layer conductivity ( $K$ )*

The conductance of the pollution layer multiplied by the form factor; it is generally expressed in  $\mu\text{S}$ .

### 3.8 *Salt deposit density ( $SDD$ )*

The amount of salt in the deposit on a given surface of the insulator (metal parts and assembling materials are not to be included in this surface), divided by the area of this surface (see 16.2); it is generally expressed in mg/cm<sup>2</sup>.

### 3.9 *Degree of pollution*

The value of the quantity (salinity, layer conductivity, salt deposit density) which characterizes the artificial pollution applied to the tested insulator.

### 3.10 *Reference salinity*

The value of the salinity used to characterize a test.

### 3.11 *Reference layer conductivity*

The value of the layer conductivity used to characterize a test: It is defined as the maximum value of the conductivity of the wetted layer of an insulator energized only for performing the conductance measurements.

### 3.12 *Reference salt deposit density*

The value of the salt deposit density used to characterize a test: It is defined as the average of the salt deposit density values measured on a few insulators (or on parts of them), which are chosen for this purpose from among the contaminated ones prior to their submission to any test.

### 3.13 *Specified withstand degree of pollution*

The reference degree of pollution at which an insulator shall withstand the specified test voltage in at least three tests out of four, under the conditions described in the relevant clauses 11 or 19.

### 3.14 *Maximum withstand degree of pollution*

The highest degree of pollution at which at least three withstand tests out of four can be obtained at the specified test voltage, under the conditions described in the relevant clauses 11 or 19.

### 3.15 *Specified withstand voltage*

The test voltage at which an insulator shall withstand the specified degree of pollution in at least three tests out of four, under the conditions described in the relevant clauses 11 or 19.

### 3.16 *Maximum withstand voltage*

The highest test voltage at which at least three withstand tests out of four can be obtained at the specified degree of pollution, under the conditions described in the relevant clauses 11 or 19.

## SECTION TWO - GENERAL TEST REQUIREMENTS

### 4 Test methods

The two following categories of pollution test methods are recommended for standard tests:

- the salt fog method (section three) in which the insulator is subjected to a defined ambient pollution;
- the solid layer method (section four) in which a fairly uniform layer of a defined solid pollution is deposited on the insulator surface.

NOTE - In these test methods the voltage is held constant for a period of at least several minutes. Variants in which the voltage is raised continuously to flashover are not standardized but may be used for special purposes.

### 5 Arrangement of Insulator for test

#### 5.1 *Test configuration*

The insulator shall be erected in the test chamber, complete with the metal fittings which are invariably associated with it. The vertical position is in general suggested for comparison of different insulator types. Tests in other positions (inclined, horizontal) duplicating actual service conditions may be carried out when agreed between the manufacturer and the purchaser. When there are special reasons not to test insulators in the vertical position (e.g. wall bushings and circuit-breaker longitudinal insulation), only the service position shall be considered.

The minimum clearances between any part of the insulator and any earthed object other than the structure which supports the insulator and the columns of the nozzles, when used, shall be not less than 0,5 m per 100 kV of the test voltage and in any case not less than 1,5 m.

The configurations of the supporting structure and the energized metal parts, at least within their minimum clearance from the insulator, shall reproduce those expected in service. The arrangement of the nozzles and their construction are described in clause 8.

As regards the influence of capacitive effects on the test results, the following considerations can be drawn from the available experience:

- fittings are deemed not to affect the results significantly, at least for test voltages up to 450 kV;
- internal high capacitance can have some effect on the external surface behaviour, particularly in tests with solid layer methods.

## 5.2 Cleaning of insulator

The insulator shall be carefully cleaned so that all traces of dirt and grease are removed. After cleaning, the insulating parts of the insulator shall not be touched by hand.

NOTE - If necessary, the metal parts and the assembling materials should be painted with a salt water resistant paint to ensure that no corrosion products wash down onto the insulating surface during the test.

Water, preferably heated to about 50 °C, with the addition of trisodium phosphate or another detergent, shall be used, after which the insulator is to be thoroughly rinsed with tap water. The surface of the insulator is deemed to be sufficiently clean and free from any grease if large continuous wet areas are observed.

Before every subsequent contamination the insulator shall be again thoroughly washed with tap water only, to remove all traces of pollution.

## 6 Requirements for the testing plant

### 6.1 Test voltage

The frequency of the test voltage shall be between 48 Hz and 62 Hz.

In general the test voltage coincides with the highest voltage (phase to earth value) the insulator is required to withstand under normal operating conditions. For equipment, it is equal to  $U_m \sqrt{3}$ ,  $U_m$  being the highest voltage for equipment (see IEC 71-1). It is higher than this value when testing insulators for phase to phase configurations or for isolated neutral systems.

### 6.2 Minimum short-circuit current

In the artificial pollution tests, the testing plant needs a short-circuit current ( $I_{sc}$ ) higher than in other types of insulator tests. This means that  $I_{sc}$  must have a minimum value which varies with the test conditions; moreover there are also requirements on other parameters of the testing plant.

The minimum value of  $I_{sc}$  ( $I_{sc \min}$ ) is given in figure 1 as a function of the electrical surface stress of the insulator under test, expressed in terms of its specific creepage distance  $L_s$ .

Besides the above requirement of  $I_{sc \min}$  value, the testing plant shall comply with the two following conditions:

- resistance/reactance ratio (R/X) equal to or higher than 0,1;
- capacitive current/short-circuit current ratio ( $I_c/I_{sc}$ ) within the range 0,001 - 0,1.

More information on the criteria followed to assess the above requirements is given in appendix A.

When the value of  $I_{sc}$  of the testing plant, although higher than 6 A, does not comply with the limits given in figure 1, the verification of a specified withstand characteristic of a polluted insulator (see clauses 11 and 18) or the determination of its maximum withstand characteristic (see appendix B) can still be performed, provided that the source validity is directly ascertained by the following check.

In each individual test of this investigation, the highest leakage current pulse amplitude is recorded and its maximum value ( $I_{h \max}$ ) determined considering the three tests resulting in withstand, in the withstand conditions.

The  $I_{h \max}$  value shall comply with the expression below:

$$I_{sc} / I_{h \max} \geq 11$$

$I_{sc}$  being given in r.m.s. and  $I_{h \max}$  in peak value.

More details are given in appendix A.

Since the leakage currents can be used for the interpretation of the results, it is recommended that suitable devices be arranged in order to record these currents during artificial pollution tests.

### SECTION THREE - SALT FOG METHOD

#### 7 Salt solution

The salt solution shall be made of sodium chloride (NaCl) of commercial purity and tap water.

NOTE - Tap water with high hardness, for example with a content of equivalent  $\text{CaCO}_3$  greater than 350 g/m<sup>3</sup>, can cause limestone deposits on the insulator surface. In this case the use of deionized water for preparation of the salt solution is recommended.

Hardness of tap water is measured in terms of content of equivalent  $\text{CaCO}_3$ \*

The salinity used shall have one of the following values: 2,5 - 3,5 - 5 - 7 - 10 - 14 - 20 - 28 - 40 - 56 - 80 - 112 - 160 and 224 kg/m<sup>3</sup>.

The prescribed tolerance error in salinity is  $\pm 5$  % of the specified value.

It is recommended that the salinity be determined either by measuring the conductivity or by measuring the density with a correction of temperature.

Table 1 gives the correspondence between the value of salinity, volume conductivity and density of the solution at a temperature of 20 °C.

\* In accordance with the *Condensed Chemical Dictionary*, revised by G. Hawley - Encyclopedia of Chemistry; Van Nostrand Reinhold Company, New York (USA), 1971.

When the solution temperature is not at 20 °C, conductivity and density values shall be corrected.

The temperature of the salt solution shall be between 5 °C and 30 °C, since no experience is available to validate tests performed outside this range of solution temperature.

Table 1 – Salt-fog method: correspondence between the value of salinity, volume conductivity and density of the solution at a temperature of 20 °C

Salinity $S_a$ kg/m <sup>3</sup>	Volume conductivity $\sigma_{20}$ S/m	Density $\Delta_{20}$ kg/m <sup>3</sup>
2,5	0,43	-
3,5	0,60	-
5	0,83	-
7	1,15	-
10	1,6	-
14	2,2	-
20	3,0	-
28	4,1	-
40	5,6	1 018,0
56	7,6	1 025,9
80	10	1 037,3
112	13	1 052,7
160	17	1 074,6
224	20	1 104,5
		1 140,0

*Handwritten notes:*  
 - A bracket groups rows 2,5 to 14.  
 - A bracket groups rows 14 to 28.  
 - A bracket groups rows 28 to 40.  
 - A bracket groups rows 40 to 56.  
 - A bracket groups rows 56 to 80.  
 - A bracket groups rows 80 to 112.  
 - A bracket groups rows 112 to 160.  
 - A bracket groups rows 160 to 224.  
 - Checkmarks are present next to salinity values 7, 28, and 80.

The conductivity correction shall be made using the following formula:

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b (\theta - 20)]$$

where:

- $\theta$  is the solution temperature (°C)
- $\sigma_{\theta}$  is the volume conductivity at a temperature of  $\theta$  °C (S/m)
- $\sigma_{20}$  is the volume conductivity at a temperature of 20 °C (S/m)
- $b$  is the factor depending on temperature  $\theta$ , as given below:

$\theta$ (°C)	$b$
5	0,03156
10	0,02817
20	0,02277
30	0,01905

NOTE - For other values of temperature  $\theta$ , within the range 5 °C - 30 °C, the factor  $b$  is obtained by interpolation.

The density correction shall be made using the following formula:

$$\Delta_{20} = \Delta_{\theta} [1 + (200 + 1,3 S_a) (\theta - 20) \times 10^{-6}]$$

where:

- $\theta$  is the solution temperature (°C)
- $\Delta_{\theta}$  is the density at a temperature of  $\theta$  °C (kg/m<sup>3</sup>)
- $\Delta_{20}$  is the density at a temperature of 20 °C (kg/m<sup>3</sup>)
- $S_a$  is the salinity (kg/m<sup>3</sup>)

This correction formula is only valid for salinities over 20 kg/m<sup>3</sup>.

*Handwritten note:* Δ (density) should be in kg/m<sup>3</sup>

## 8 Spraying system

The fog is produced in the test chamber by means of the specified number of sprays which atomize the solution by a stream of compressed air flowing at right angles to the solution nozzle. The nozzles consist of corrosion resistant tubes, the internal diameter of the air nozzles being 1,2 mm ± 0,02 mm and the internal diameter of the solution nozzle being 2,0 mm ± 0,02 mm. Both nozzles shall have an outside diameter of 3,0 mm ± 0,05 mm and the ends of the nozzles shall be square-cut and polished.

The end of the solution nozzle shall lie on the axis of the air nozzle to within ±0,05 mm. The distance between the end of the compressed air nozzle and the central line of the solution nozzle shall be 3,0 mm ± 0,05 mm. The axes of the two nozzles shall lie in the same plane to within ±0,05 mm.

Figure 2 shows a typical construction of the fog spray nozzle.

The sprays shall be in two columns parallel to and on opposite sides of the insulator which shall have its axis in the same plane as the columns, i.e. a vertical insulator is tested with vertical columns and a horizontal insulator with horizontal columns. In the case of an inclined insulator (see figure 3) the plane containing the insulator and the columns shall intersect the horizontal plane in a line at right angles to the insulator axis; in this case, the axis of the solution nozzles is vertical. The distance between the solution nozzles and the insulator axis shall be 3,0 m ± 0,05 m.

The sprays shall be spaced at 0,6 m intervals, each spray pointing at right angles to the column axis towards its counterpart on the other column and within an angle of 1° to the plane of the sprays. This alignment can be checked for vertical sprays by lowering the solution nozzle, passing water through the air nozzle and directing it towards the opposing spray; afterwards, raising the solution nozzle to the operating position. The mid-point of the insulator shall preferably be in line with the mid-points of the columns of sprays. Both columns shall extend beyond each end of the insulator by at least 0,6 m.

The minimum number  $N$  of sprays per column shall be, for a length  $H$  in metres of the insulator:

$$N = \frac{H}{0,6} + 3$$

The sprays shall be supplied with filtered, oil-free air at a relative pressure of 700 kPa  $\pm$  35 kPa.

The flow of solution to each spray shall be 0,5 dm<sup>3</sup>/min  $\pm$  0,05 dm<sup>3</sup>/min for the period of the test, and the tolerance on the total flow to all sprays shall be  $\pm$ 5 % of the nominal value.

## 9 Conditions before starting the test

The test shall start while the insulator, cleaned according to 5.2, is still completely wet.

At the start of the test the insulator shall be in thermal equilibrium with the air in the test chamber. In addition, the ambient temperature shall be not less than 5 °C nor greater than 40 °C and its difference from the temperature of the water solution shall not exceed 15 K.

The insulator is energized, the salt-solution pump and air compressor are switched on, and the test is deemed to have started as soon as the compressed air has reached the normal operating pressure at the nozzles.

## 10 Preconditioning process

The insulator, prepared in the normal way, is subjected to the test voltage at the reference salinity for 20 min, or until the insulator flashes over; if the insulator does not flash over, the voltage is raised in steps of 10 % of the test voltage every 5 min until flashover.

After flashover, the voltage is reapplied and raised as quickly as possible to 90 % of the previously obtained flashover voltage, and thereafter increased in steps of 5 % of the initial flashover voltage every 5 min until flashover. The last process is repeated six further times, in each of them the voltage is raised rapidly to 90 % of the last obtained flashover voltage and then in steps of 5 % every 5 min until flashover. After the eight flashovers, the fog shall be cleared, the insulator shall be washed down with tap water and then the withstand test (see clause 11) shall start as soon as possible.

The characteristics of the voltage source in the preconditioning process shall be not lower than those used as references in the withstand test (see clause 6).

If the preconditioning process performed at the reference salinity requires excessively high voltages, the use of higher values of salinity for the preconditioning is allowed. If, in spite of this expedient, the voltage required remains too high, shorter sections of the insulator may be separately preconditioned using adequate procedures to avoid overstressing of the internal insulation, if any (e.g. in the case of arresters or bushings).

#### 11 Withstand test

The object of this test is to confirm the specified withstand salinity of the insulator at the specified test voltage.

The test shall start when the test insulator and the chamber conditions fulfil the requirements given in clause 9 and after the preconditioning of the insulator according to clause 10.

A series of tests are performed on the insulator at the specified test voltage, using a salt solution having the specified test salinity in accordance with clause 7. The duration of each test shall be 1 h, if no flashover occurs before that time has elapsed. The insulator shall be carefully washed with tap water before each subsequent test.

#### 12 Acceptance criterion for the withstand test

The insulator complies with this specification if no flashover occurs during a series of three consecutive tests in accordance with the procedure in clause 11. If only one flashover occurs, a fourth test shall be performed and the insulator then passes the test if no flashover occurs.

NOTE - For research purposes the withstand characteristics of an insulator can be determined. Practices for assessing or checking these characteristics are given in appendix B.

### SECTION FOUR - SOLID LAYER METHODS

#### 13 Composition of the contaminating suspension

A suspension shall be prepared using one of the two following compositions:

##### 13.1 Kieselguhr composition

It consists of:

- 100 g Kieselguhr (diatomaceous earth, diatomite), see clause 14;
- 10 g highly-dispersed silicon dioxide, particle size 2-20 nm;
- 1 000 g tap water;
- a suitable amount of NaCl of commercial purity.

When the volume conductivity of tap water is higher than 0,05 S/m, the use of demineralized water is recommended.

To achieve the reference degree of pollution on the insulator under test, with the prescribed tolerance of  $\pm 15\%$ , an appropriate value of volume conductivity of the prepared suspension is to be determined by submitting the insulator itself (or a part of it) to preliminary contamination trials. The desired volume conductivity is reached by adjusting the amount of salt in the suspension. As an approximate guide to start the trials, table 2 below gives an approximate correspondence between the reference degree of pollution on the insulator and the volume conductivity of the suspension at a temperature of  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Table 2 – Kieselguhr composition: approximate correspondence between the reference degrees of pollution on the insulator and the volume conductivity of the suspension at a temperature of  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Reference degrees of pollution for Kieselguhr composition		Volume conductivity of the suspension $\sigma_{20}$ S/m
Salt deposit density SDD mg/cm <sup>2</sup>	Layer conductivity $K_{20}$ $\mu\text{S}$	
0,0176	7	0,21
0,025	10	0,30
0,0353	14	0,42
0,05	20	0,60
0,0705	28	0,85
0,1	40	1,20
0,141	56	1,69
0,20	80	2,40

### 13.2 Kaolin (or Tonoko) composition

It consists of:

- 40 g Kaolin (or Tonoko), see clause 14;
- 1 000 g tap water;
- a suitable amount of NaCl of commercial purity.

When the volume conductivity of tap water is higher than  $0,05\text{ S/m}$ , the use of demineralized water is recommended.

To achieve the reference degree of pollution on the insulator under test, with the prescribed tolerance of  $\pm 15\%$ , an appropriate value of volume conductivity of the prepared suspension is to be determined by submitting the insulator itself (or part of it) to preliminary contamination trials. The desired volume conductivity is reached by adjusting the amount of salt in the suspension.

As an approximate guide to start the trials, table 3 below gives an approximate correspondence between the reference degree of pollution on the insulator and the volume conductivity of the suspension at a temperature of  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , in the case of standard cap and pin insulators contaminated in a vertical position in normal ambient conditions. The volume conductivity required for other insulators can vary from the values given in table 3.

21511024206  
± kaolin

Table 3 – Kaolin (or Tonoko) composition: approximate correspondence between the reference degrees of pollution on the insulator and the volume conductivity of the suspension at a temperature of 20 °C

Reference degrees of pollution for Kaolin (or Tonoko) composition		Volume conductivity of the suspension $\sigma_{20}$ S/m
Salt deposit density <i>SDD</i> mg/cm <sup>2</sup>	Layer conductivity $K_{20}$ $\mu\text{S}$	
0,025	3	1
0,035	4,2	1,4
0,05	5,5	2
0,07	8	2,8
0,1	11	4
0,14	14,5	5,6
0,2	20	8
0,28	27	11,2
0,4	37	16

#### 14 Main characteristics of inert materials

Ranges of values for the main characteristics of the types of Kieselguhr, Kaolin and Tonoko that are used for the suspensions are given in the following table 4.

Inert materials having other names, but whose characteristics are proved to match with the same ranges of one of the above-mentioned types, may be used in place of that type.

Table 4 – Main characteristics of the inert materials used in solid layer suspensions

Type of inert material	Weight composition %				Granulometry (cumulative distribution) $\mu\text{m}$			Volume conductivity $\sigma_{20}$ S/m
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	16 %	50 %	84 %	
	Kieselguhr	70-90	5-25	0,5-6	7-14	0,1-0,2	0,4-1	
Kaolin	40-50	30-40	0,3-2	7-14	0,1-0,2	0,4-1	2-10	0,0015-0,02
Tonoko	60-70	10-20	4-8	-	0,8-1,5	3-5	8-15	0,002-0,01

#### NOTES

1 Granulometry distribution gives the values of the hole diameter of a sieve in  $\mu\text{m}$  through which one of the quoted percentages of the total mass of particles passes.

2 Volume conductivity for the characterization of inert material is determined with the use of demineralized water.

kaolin αx

## 15 Application of the pollution layer

The suspension prepared using one of the compositions described in clause 13 shall be applied by spraying or flowing on the dry insulator, previously cleaned according to 5.2, to obtain a reasonably uniform layer. Alternatively the insulator may be dipped in the suspension, provided its size makes this operation possible.

### NOTES

1 The use of a probe (see appendix C) is suggested for a check on the wet layer, when the uniformity does not appear to be satisfactory during visual examination.

2 The artificial layer may be applied on the insulator surface by spraying the prepared suspension through one or two nozzles of a commercial type spray gun. The direction of the spray nozzles shall be adjusted to ensure a reasonably uniform layer on the whole insulator surface. A distance of about 20 cm to 40 cm between the spray nozzle outlet and the rim of the insulator shed has been found satisfactory. It is desirable to keep the suspension stirred.

The required degree of pollution on the insulator may be obtained by repeated applications.

3 The coating time can be reduced by preheating the insulator. In this case the complete insulator should be in thermal equilibrium with the air in the test chamber at the start of the test. The coating time can also be reduced by drying the layer between successive applications.

Other techniques are suitable and can also be used. For instance the practice of flooding the prepared suspension over the insulator surface, until it is flowing-on ("flow-on" technique), is particularly suitable for large or long insulators, when Kaolin or Tonoko compositions are used.

4 A preconditioning process, as specified for the salt fog test, is not necessary with the solid layer methods. More details are given in clause D.1.

The layer shall be left to dry prior to the submission of the insulator to the test. More details are given in clause D.2.

## 16 Determination of the degree of pollution of the tested insulator

The degree of pollution of the tested insulator, expressed in terms of layer conductivity or salt deposit density, is determined as follows.

### 16.1 Layer conductivity ( $K$ )

As already mentioned, the layer conductivity is calculated by multiplying the layer conductance measured on the unenergized insulator by its form factor.

The layer conductance measurement is repeated on the insulator during its wetting, with the aim of determining the maximum value reached.

Each measurement of the layer conductance consists of applying to the insulator a voltage not lower than 700 V r.m.s. per metre of overall creepage distance and measuring the current flowing through the wet layer. The voltage must be applied only long enough to read the meter.

When higher voltage values are used, the measuring time shall be short enough to avoid serious error due to heating or drying of the pollution layer. To this aim it shall be checked that neither surge activity nor amplitude variations affect the shape of the measured current.

Alt + 0176

The layer conductivity shall be related to the reference temperature of 20 °C, using the following formula:

$$K_{20} = K_{\theta} [1 - b (\theta - 20)]$$

where:

- $\theta$  is the temperature of the insulator surface (°C)
- $K_{\theta}$  is the layer conductivity at a temperature of  $\theta$  °C ( $\mu S$ )
- $K_{20}$  is the layer conductivity at a temperature of 20 °C ( $\mu S$ )
- $b$  is the factor already defined in clause 7.

one cylindrical insulator available for test

### 16.2 Salt deposit density (SDD)

The deposit is removed and carefully collected from the surface of a separate insulator (or from a part thereof), identical to the tested one and contaminated in the same way. The whole surface of this insulator, or the upper and lower surfaces separately, are cleaned for this purpose, excluding metal parts. More details are given in clause D:6.

In the case where only one cylindrical insulator is available for test, measurement of salt deposit density is made on a few of its sheds. Thereafter, the cleaned surface shall be re-polluted by re-applying the pollution layer.

After the contaminating operation on the insulator (or part thereof) chosen for SDD measurement, the drops shall be removed carefully before drying the layer. In this way, errors can be avoided in quantifying the degree of pollution really effective in the test.

The deposit is then dissolved in a known quantity of water, preferably demineralized water. The resulting suspension is kept stirred for at least 2 min before the measurement of its volume conductivity  $\sigma_{\theta}$  (S/m) at the temperature  $\theta$  (°C). Then the value  $\sigma_{20}$  is obtained from  $\sigma_{\theta}$  by the same relationship as that given in clause 7.

The salinity  $S_a$  (kg/m<sup>3</sup>) of the suspension is determined, when  $\sigma_{20}$  is within the range 0,004-0,4 S/m, by the use of the following formula:

$$S_a = (5,7 \sigma_{20})^{1,03}$$

The salt deposit density SDD (mg/cm<sup>2</sup>) is then obtained by the following formula:

$$SDD = \frac{S_a \cdot V}{A}$$

where:

- $V$  is the volume of the suspension (cm<sup>3</sup>) ( $V = \text{volume to be measured}$ )
- $A$  is the area of the cleaned surface (cm<sup>2</sup>)

no quantity of distilled water

① collect contaminate in a known quantity water

② stir the suspension for at least 2 min

③ measurement of its volume conductivity

### 17 General requirements for the wetting of the pollution layer

The test object shall be wetted by means of fog generators which provide an uniform fog distribution over the whole length and all around the test object. The temperature of the test object at the beginning of the wetting shall be within  $\pm 2$  K of the ambient temperature in the test chamber. A plastic tent, surrounding the test object, may be used to limit the volume of the test chamber.

⑤ determine  $S_a$  by the following formula

$SDD = \frac{S_a \cdot V}{A}$   
at the temperature  $\theta$  (°C)  
 $\sigma_{\theta} \Rightarrow \sigma_{20}$

The fog generation in the test chamber shall be maintained until the end of each individual test at a constant steady rate of flow.

After a certain degree of wetting of the pollution layer is reached, moisture starts to drip from the edges of insulator sheds; thus some pollutant content is removed from the layer and a progressive washing of the test object can be expected. 15 min

## 18 Test procedures

Two alternative procedures are proposed, basically differing in the layer conditions, wet or dry, of the test object at the instant at which the test voltage is applied to it.

The main rules relevant to the two test procedures are given below.

### 18.1 Procedure A - Wetting before and during energization

For this procedure, the insulator is contaminated using either Kieselguhr composition (see 13.1) or Kaolin (or Tonoko) composition (see 13.2). The degree of pollution is generally expressed in terms of layer conductivity, but the salt deposit density may be used also.

The insulator is prepared for the test according to clause 15 and placed in its test position in the chamber, when the fog generation is started.

Steam fog should preferably be used to wet the pollution layer.

A steam fog generator, consisting of a distribution pipe, with nozzles spaced at equal distance, is shown in figure 4, as an example.

NOTE - Instead of the steam fog, it is permitted to use a fog generated with nozzles spraying warm or cold water (see as an example the device in figure 2), provided that this fog gives the recommended uniform wetting.

When this variant is used, before starting the test, cooling of the test object may be advantageous.

For the evaluation of the layer conductivity, layer conductance measurements are performed on the test object according to 16.1.

The flow rate of the fog input in the chamber, at normal ambient temperature, shall be sufficiently high to ensure that the layer conductivity reaches its maximum value within 20 min to 40 min from the start of the fog generation. The maximum value of the layer conductivity measured in the test is assumed to be the reference layer conductivity.

The test voltage is then applied, either instantaneously or during a time not exceeding 5 s, and maintained until flashover, or for 15 min if no flashover occurs.

The insulator is then removed from the fog chamber and allowed to dry. It is placed for the second time in the chamber and re-wetted by the fog until the layer conductivity reaches its maximum value; if this is not lower than 90 % of the above-mentioned reference value,

the test voltage is applied again and maintained until flashover, or for 15 min if no flashover occurs; if it is lower than 90 %, the pollution layer shall be applied again to the insulator, according to clause 15.

No more than two consecutive tests shall be performed on an insulator with the same pollution layer.

### 18.2 Procedure B - Wetting after energization

For this procedure, the insulator is contaminated using Kaolin (or Tonoko) composition (see 13.2). The degree of pollution is generally expressed in terms of salt deposit density (see 16.2).

NOTE - Measurements of the layer conductance are generally not requested. On agreement between the manufacturer and the purchaser, they may be performed during the wetting on a separate, unenergized insulator, identical to the one tested (or to a part of it) and contaminated in the same way.

The insulator is prepared for the test according to clause 15 and placed in its test position in the chamber with the pollution layer still dry.

Steam fog shall be used for wetting the pollution layer.

The fog generators shall be under the test object as close as possible to the floor level. In all cases they shall be at least 1 m away from the test object and their flow shall not be directed towards it.

The steam input rate in the chamber shall be zero until the test voltage is applied and constant thereafter. At normal ambient temperature, the steam input rate shall be within the range  $0,05 \text{ kg/h} \pm 0,01 \text{ kg/h}$  per cubic metre of the test chamber volume. In particular test conditions this value may need some adjustment through a direct check of the wetting action of the fog as described in clause D.3.

The test voltage is maintained until flashover occurs. Otherwise it is maintained for 100 min from the start of the test or until the current peaks, if they are measured, have decreased to values permanently lower than 70 % of the maximum peak recorded. More details are given in clauses D.4 and D.5.

For this procedure the pollution layer is used only once.

## 19 Withstand test and acceptance criterion (common to both Procedures A and B)

The object of this test is to confirm the specified withstand degree of pollution at the specified test voltage. The insulator complies with this specification if no flashover occurs during three consecutive tests performed in accordance with 18.1 for Procedure A or with 18.2 for Procedure B.

If only one flashover occurs, a fourth test shall be performed and the insulator then passes the test if no flashover occurs.

NOTE - For research purposes the withstand characteristics of an insulator can be determined. Practices for assessing or checking these characteristics are given in appendix B.

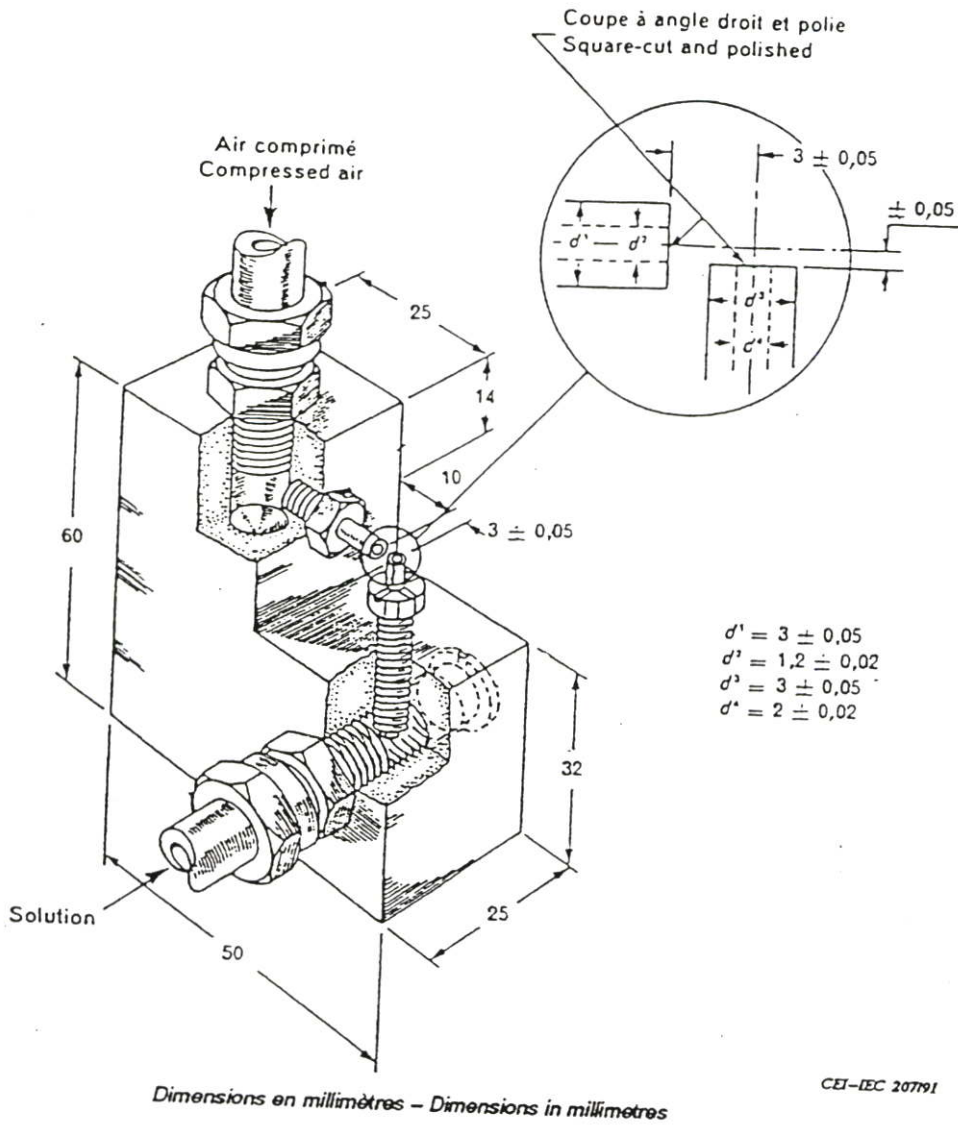
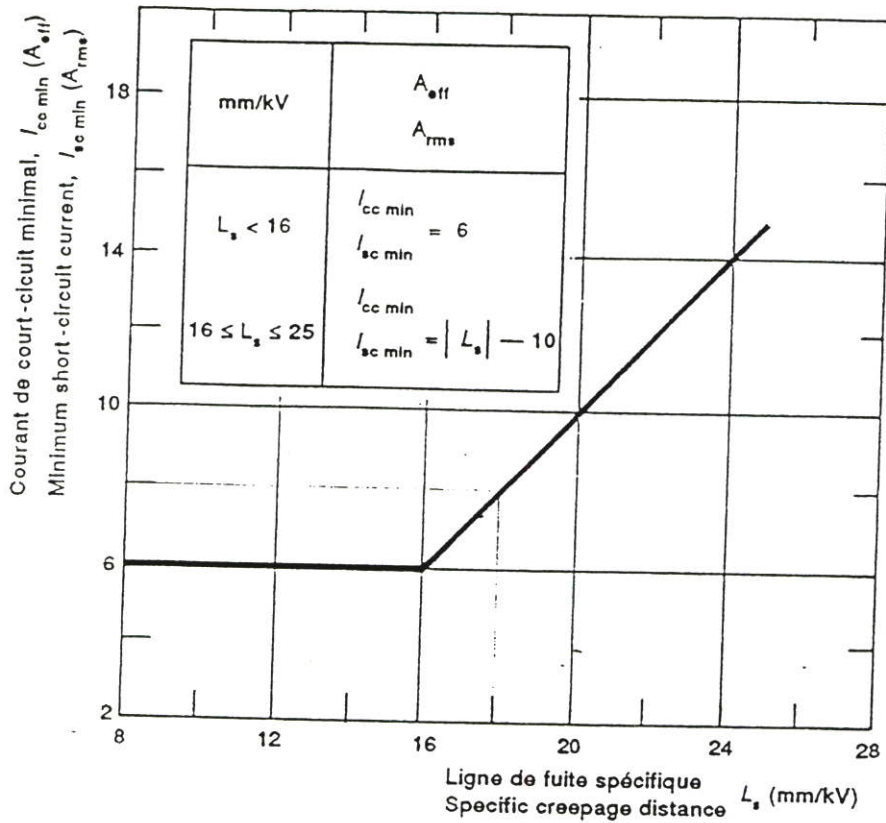


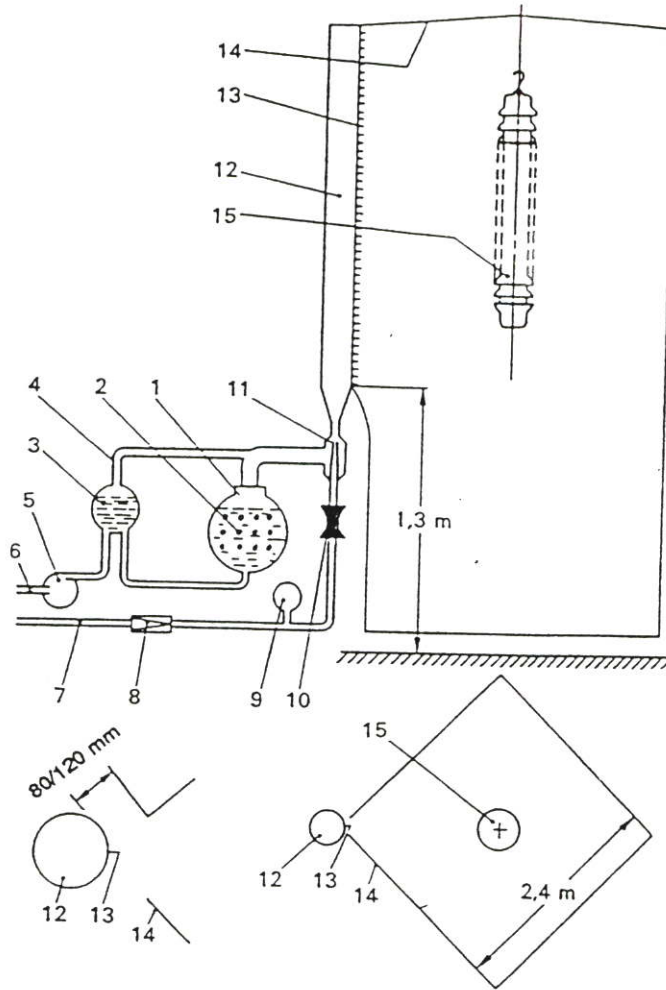
Figure 2 - Construction type d'un pulvérisateur de brouillard  
 Typical construction of fog spray nozzle



CEI-IEC 206/91

Figure 1 – Courant de court-circuit minimal,  $I_{cc min}$ , requis pour l'installation d'essai, en fonction de la ligne de fuite spécifique,  $L_s$ , de l'isolateur en essai. (L'expérience dont on dispose n'est pas suffisante pour donner des valeurs de  $I_{cc min}$  pour les essais avec des lignes de fuite spécifiques supérieures à 25 mm/kV.)

Minimum short-circuit current,  $I_{sc min}$ , required for the testing plant, as a function of the specific creepage distance,  $L_s$ , of the insulator under test. (The available experience is deemed insufficient to give  $I_{sc min}$  values for tests at specific creepage distances higher than 25 mm/kV.)



CEI-IEC 208/91

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 = chaudière à basse pression de capacité d'environ 20 l                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1 = low-pressure boiler, capacity about 20 l                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 2 = chauffage électrique: 12 bobines chauffantes de 3 kW chacune                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 2 = electrical heater: 12 heating coils, each of 3 kW                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 3 = vanne régulatrice d'alimentation d'eau                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3 = feed-water regulator valve                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 4 = conduite égalisatrice de pression                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 4 = pressure-equalizing pipe                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 5 = pompe d'alimentation de la chaudière: 50 l/h, 1 bar                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5 = boiler feed pump: 50 l/h, 1 bar                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 6 = alimentation en eau adoucie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 = connection for softened water                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 7 = alimentation en air comprimé                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 7 = connection for compressed air                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 8 = vanne ajustable de pression de l'air comprimé                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 8 = adjustable compressed-air reduction valve                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 9 = manomètre: 0 bar à 5 bars                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 9 = pressure gauge: 0-5 bars                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 10 = vanne d'air comprimé, commande électrique à distance                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 10 = compressed-air valve, electric remote control                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 11 = ajutage d'injection: 7,5/16 mm de diamètre                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 11 = injector nozzle: 7,5/16 mm diameter                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 12 = tuyau à ajutages multiples. Trois tuyaux à ajutages ayant chacun 1,5 m de longueur et un tuyau intermédiaire sans ajutages pour des installations élevées. Hauteur totale, hors tout, à partir du sol: 11 m; diamètre intérieur du tuyau inférieur: 120 mm; diamètre intérieur des tuyaux réduit par paliers jusqu'à 50 mm pour le tuyau supérieur | 12 = multipart nozzle pipe. Three nozzle pipes, each of 1,5 m length, and one intermediate pipe without nozzles for elevated installation. Overall total height from ground: 11 m; internal diameter of the lower pipe: 120 mm; internal diameter of the pipes reduced in steps to 50 mm for the upper pipe |
| 13 = ajutage, diamètre intérieur: 1,6 mm; distance entre deux ajutages consécutifs: 30 mm                                                                                                                                                                                                                                                               | 13 = nozzle, internal diameter: 1,6 mm; distance between adjacent nozzles: 30 mm                                                                                                                                                                                                                            |
| 14 = tente en matière plastique                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 14 = plastic tent                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 15 = objet à essayer                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 15 = test object                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

Figure 4 – Disposition type d'un générateur de brouillard à base de vapeur  
 Typical arrangement of steam-fog generator



*main*  
*1.3.1.1*

## Appendix A

### Supplementary information on the assessment of the requirement for the testing plant

Many laboratories have provided measurements of the highest leakage current pulse amplitudes  $I_h$  occurring on a polluted insulator throughout the duration of all individual withstand tests in withstand conditions (see appendix B), which have been examined. The table below gives for the different levels of the electrical surface stress and for the specified conditions of the testing plant (clause 6) the maximum  $I_h$  values ( $I_{h \max}$ ) recorded on all insulator types in any test position.

Specific creepage distance* - $L_s$ mm/kV	$I_{h \max}$ $A_{\text{peak}}$
16	0,55
20	0,85
25	1,35

\* Creepage distance divided by the product of the test voltage and  $\sqrt{3}$ .

NOTE - These  $I_{h \max}$  values may be exceeded when an insulator is tested in conditions more critical than those mentioned above, for example when the flashover probability is higher than that corresponding to a withstand test in withstand conditions.

If the ratio  $I_{sc} / I_{h \max}$  is considered,  $I_{sc}$  being defined in 6.2, its limit value, above which test results (e.g. withstand voltage or withstand degree of pollution, see appendix B) are no more influenced by the ratio itself, can be determined. On the basis of the available laboratory experience, this limiting value is estimated as equal to 11 in the range of the electrical surface stress given in the table above.

As regards the ratio  $I_c / I_{sc}$ , the specified limits are usually met by several testing plants. In particular the lower limit is generally complied with due to the amount of the equivalent source capacitance, the lumped capacitance (bushing and voltage divider) and the stray capacitances of the circuit.

## Appendix B

### Determination of the withstand characteristics of insulators

Sections Two, Three and Four deal with the verification of the specified withstand degree of pollution, at the specified test voltage. In addition, however, the characteristics of an insulator can be determined over a range of voltage, or, in other words, over a range of specific creepage distances of the insulator itself. To do this the maximum withstand degree of pollution is measured at different voltage levels or, in some other cases, the maximum withstand voltage, or the 50 % withstand voltage, at different reference degrees of pollution values. Examples of procedures for such evaluations are described below.

Directions for checking the laboratory equipment for artificial pollution tests, when requested, are given in clause B.3.

#### B.1 Determination of the maximum withstand salinity at a given test voltage

The insulator shall be subjected to a number of tests at a given test voltage and at different salinities among those listed in clause 7. The test shall be performed according to clause 11.

The tests can be carried out in any sequence providing that:

- a) when the total number of flashovers at any salinity reaches two, no further tests shall be carried out at the same or higher salinities;
- b) when the total number of withstands reaches three, no further tests shall be carried out at the same or lower salinities.

The preconditioning process (see clause 10) shall be performed on the insulator before the determination of the maximum withstand salinity.

NOTE - When test series of long duration are performed, the insulator may need cleaning, as recommended in 5.2, and subsequently preconditioned whenever the conditions of the insulator require it.

If four withstands are recorded at 224 kg/m<sup>3</sup> salinity, the maximum withstand salinity shall be assumed as being equal to or greater than 224 kg/m<sup>3</sup>. If one flashover and three withstands are recorded at 224 kg/m<sup>3</sup> salinity, this salinity shall be considered as the maximum withstand salinity.

#### B.2 Determination of the maximum withstand voltage, or of the 50 % withstand voltage, at a given reference layer conductivity, or at a given reference salt deposit density

##### B.2.1 Maximum withstand voltage

A series of tests shall be carried out on insulators having a given value of reference layer conductivity or reference salt deposit density. Each test shall be carried out at any one of a number of voltage levels, each of which shall be about 1,05 times the next lowest value.

Each test shall be made in accordance with clause 18.

The tests can be carried out in any sequence provided that:

- a) when the total number of flashovers at any voltage reaches two, no further tests shall be carried out at the same or higher voltage levels;
- b) when the total number of withstands at any voltage reaches three, no further tests shall be carried out at the same or lower voltage levels.

### B.2.2 50 % withstand voltage

The insulator shall be subjected to at least ten "useful" tests at a given reference degree of pollution. The test shall be made in accordance with 18.2. The applied voltage level in each test shall be varied according to the up-and-down method. The voltage step shall be about 10 % of the expected 50 % withstand voltage.

The first "useful" test should be selected as being the first one that yields a result different from the preceding ones. Only this test and at least nine of the following tests should be taken as useful tests to be considered to determine the 50 % withstand voltage. The calculation of the 50 % withstand voltage shall be made using the following formula:

$$U_{50\%} = \frac{\sum (n_i \times U_i)}{N}$$

where:

$U_i$  is an applied voltage level

$n_i$  is the number of groups of tests carried out at the same applied voltage level  $U_i$

$N$  is the number of useful tests

More details on the up-and-down method and processing of the relevant results are to be found in IEC 60-1.

NOTE - The 50 % withstand voltage is often referred to as "50 % flashover voltage".

### B.3 Withstand values of reference suspension insulators

To facilitate checking of existing or new laboratory equipment for artificial pollution tests, ranges of values for the withstand characteristics of a few reference suspension insulators are given in table B.1. These values, which are based on results from several laboratories, located at less than 1 000 m altitude above sea level, were obtained according to the recommendations given in this standard.

NOTE - The reference suspension insulators given in table B.1 are not to be seen as representative of their respective classes. Their choice does not imply by itself any judgement of merit or any assumption that they might have better performance than other similar types in tests or in operating conditions.

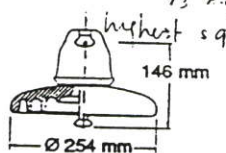
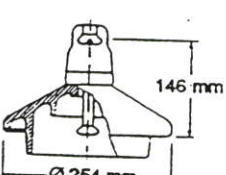
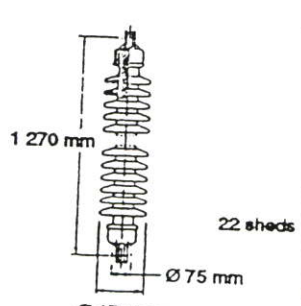
*Handwritten notes:*  
 n  
 max: m  
 min: n  
 insulator

Laboratories starting artificial pollution tests or which are located at altitudes higher than 1 000 m above sea level, or which do not commonly use one of the above mentioned test methods, may expect, in the relevant results, some variation from the ranges of values given in table B.1.

NOTE - IEC 60-1 states that no humidity correction shall be applied for artificial pollution tests and informs that air density correction for such tests is under consideration.

Table B.1 - Ranges of values of withstand characteristics of reference suspension insulators in artificial pollution tests

Single strings in vertical arrangement

Insulator type and number of units per string	Specific creepage distance	Applied voltage (r.m.s.)	Salt fog test method	Solid layer methods <sup>1)</sup>			
				Procedure A		Procedure B	
				Maximum withstand salinity	Maximum withstand layer conductivity	Maximum withstand salt deposit density	Maximum withstand layer conductivity
mm/kV	kV	kg/m <sup>3</sup>	µS	mg/cm <sup>2</sup>	mg/cm <sup>2</sup>	µS	
 <p>9 units Overall creepage distance: 2 630 mm</p>	$\frac{L}{\sqrt{3} \text{ height}}$ 16	85	7-14	7-14	0,02-0,04		
 <p>9 units Overall creepage distance: 3 510 mm</p>	20	101	28-56	14-28	0,04-0,1		
 <p>22 sheds 1 270 mm Ø 75 mm Ø 175 mm</p> <p>1 unit Overall creepage distance: 2 960 mm</p>	20	85	14-28	14-40	0,025-0,08		
	25	68	40-80	28-56	0,06-0,13		

<sup>1)</sup> The values of maximum withstand layer conductivity and maximum withstand salt deposit density for procedure A refer to tests carried out using the composition of the suspension given in 13.1. Values for procedure B are still under consideration.

Laboratories starting artificial pollution tests or which are located at altitudes higher than 1 000 m above sea level, or which do not commonly use one of the above mentioned test methods, may expect, in the relevant results, some variation from the ranges of values given in table B.1.

NOTE - IEC 60-1 states that no humidity correction shall be applied for artificial pollution tests and informs that air density correction for such tests is under consideration.

Table B.1 - Ranges of values of withstand characteristics of reference suspension insulators in artificial pollution tests

Single strings in vertical arrangement

Insulator type and number of units per string	Specific creepage distance	Applied voltage (r.m.s.)	Salt fog test method	Solid layer methods <sup>1)</sup>			
				Procedure A		Procedure B	
				Maximum withstand layer conductivity	Maximum withstand salt deposit density	Maximum withstand salt deposit density	Maximum withstand layer conductivity
	mm/kV	kV	kg/m <sup>2</sup>	µS	mg/cm <sup>2</sup>	mg/cm <sup>2</sup>	µS
<p>is 2630 sqrt(3) height highest = 94.90 kv 146 mm Ø 254 mm 292 = leakage distance 2630 = 292 x 9</p>	$\frac{L}{\sqrt{3} \text{ height}}$ 16	95	7-14	7-14	0,02-0,04		
<p>9 units 9 unit Overall creepage distance: 2 630 mm</p>	20	76	20-40	14-28	0,04-0,1		
<p>leakage 146 mm Ø 254 mm</p>	20	101	28-56	14-28	0,04-0,1		
<p>146 mm Ø 254 mm</p>	25	81	80-160	20-40	0,06-0,15		
<p>1 270 mm Ø 75 mm Ø 175 mm 22 sheds</p>	20	85	14-28	14-40	0,025-0,08		
<p>Ø 175 mm</p>	25	68	40-80	28-56	0,06-0,13		
<p>1 unit Ø 175 mm</p>							
Overall creepage distance: 2 960 mm							

1) The values of maximum withstand layer conductivity and maximum withstand salt deposit density for procedure A refer to tests carried out using the composition of the suspension given in 13.1. Values for procedure B are still under consideration.

## Appendix C

### Measurement of layer conductivity for checking the uniformity of the layer

The device for the measurement of the layer conductivity ( $K$ ) of the wet layer on an insulator surface basically consists of a probe and a meter. As an indication a possible arrangement of such a device is described in the following:

- *Probe* (figure C.1)

Two spherical stainless steel electrodes, 5 mm in diameter and having a distance of 14 mm between centres, overhanging from the probe shall be pressed by hand against the insulator surface. A constant surface pressure is obtained by means of a spring mechanism developing a force of about 9 N.

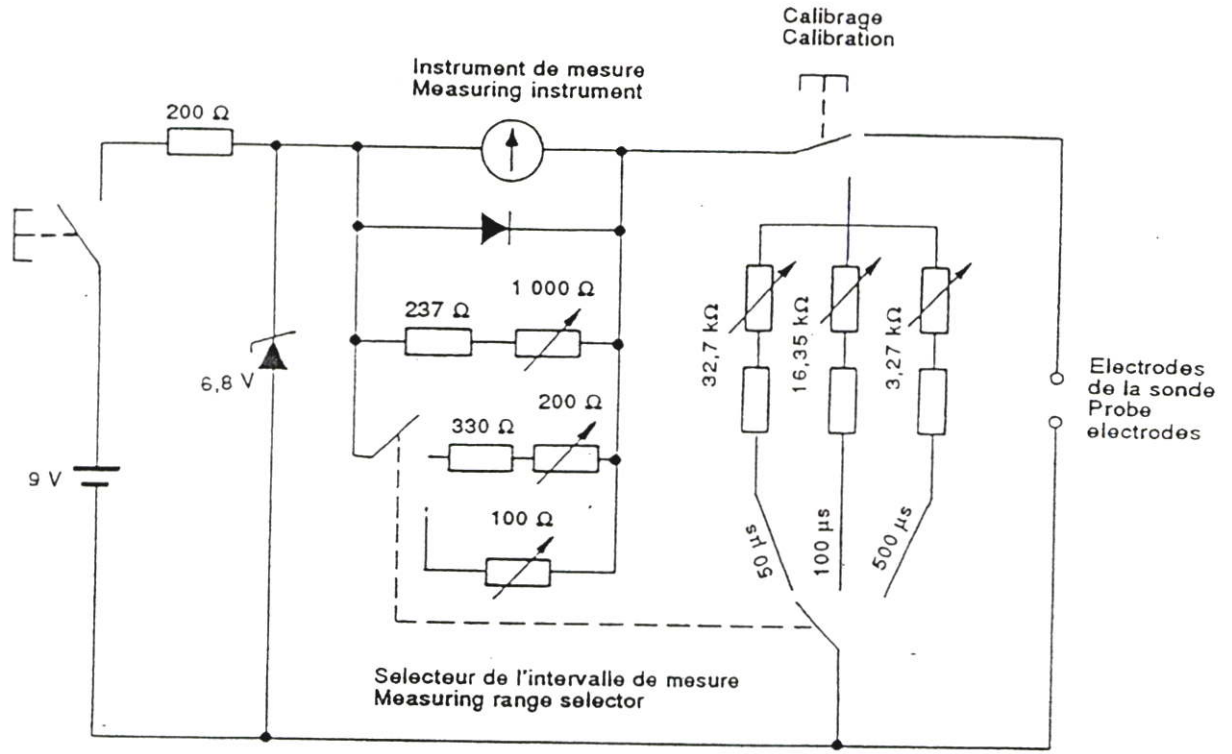
- *Meter* (figure C.2)

A voltage source stabilized by a Zener-diode at 6,8 V supplies the current across the electrodes and the surfaces between them. The measuring instrument with a full scale deflection at 50  $\mu\text{A}$  is protected by a diode in parallel.

For thin films with a layer conductivity of 50  $\mu\text{S}$ , the resistance between the electrodes is assumed to be 32,7 k $\Omega$ : the respective values for 100  $\mu\text{S}$  and 500  $\mu\text{S}$  layer conductivity are 16,35 k $\Omega$  and 3,27 k $\Omega$ . Each of these resistances is combined with a test battery inserted in parallel with the electrodes. The selector switch is used to choose the full scale deflection for the respective measuring ranges.

The above measurement of layer conductivity shall be carried out at different points of the insulator surface. The polarization effect shall be taken into account by a momentary operation of the meter push-button.

The uniformity of the layer is deemed acceptable when the difference between each of the measurements and their average, as a percentage of the average value, does not exceed the limits  $\pm 30\%$ .



CEI-IEC 210/91

Instrument de mesure  
 Charge nominale 50  $\mu$ A  
 Résistance interne 1,5 k $\Omega$

Measuring instrument  
 Charging rate 50  $\mu$ A  
 Internal resistance 1,5 k $\Omega$

Figure C.2 – Schéma de l'appareil de mesure  
 Circuit diagram of the meter

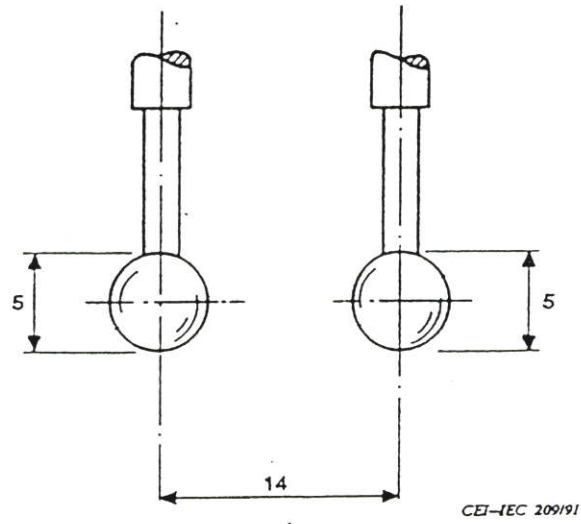


Figure C.1 – Configuration des électrodes de la sonde  
(toutes les dimensions en mm)

Arrangement of the probe electrodes  
(all dimensions in mm)

## Additional recommendations concerning the solid layer method procedures

The additional recommendations given below go more deeply into the practices of the solid layer methods, providing criteria for auxiliary controls during the tests and preventing users not yet sufficiently expert in this field from possible inaccuracies.

Clauses D.1 and D.2 are general, while the remaining clauses D.3 to D.6 mainly refer to procedure B of the solid layer methods.

### D.1 Contamination practice

When the spraying or "flow-on" practice is used, the operation can be performed on the insulator placed in the chamber in its test position. When the dipping practice is used, the insulator shall be contaminated before its erection in the test chamber. If the insulator consists of several units in series, each of them shall be dipped separately and then be kept with its axis vertical for the duration of dripping of the contaminant and until the layer is completely dry.

If, after the contaminating operation, a blotched layer is observed on the insulator, its surface shall be washed and cleaned again according to 5.2. Then one or more trial contaminations are performed, each followed by the relevant washing, until a continuous layer is obtained on the insulator. The tests may then be started. Experience has shown that, in general, it suffices to repeat the operation several times in order to have the insulator surface ready to be contaminated in a satisfactory way, without using any preconditioning process.

### D.2 Drying of the pollution layer

Natural drying of the pollution layer on the insulator may be sufficient, provided that it lasts long enough (6 h - 8 h) while the relative humidity around the insulator is kept not higher than 70 %. Humidity values lower than this level allow shorter drying times.

If hot air is used to accelerate the drying of the layer, the method for producing hot air shall not result in the deposition of material which affects either the wetting of the insulator surface or the degree of pollution. For instance, some flame combustion may generate oil substances which may inhibit the wetting of the insulator surfaces.

Finally the speed of the hot air flow is to be controlled, in order to prevent the removal of any content of the layer from the insulator surface.

### D.3 Check of the wetting action of the fog

In cases of very low or high outdoor temperature, especially with poor thermal insulation of the chamber, high altitude, or the presence of turbulence in the chamber, a direct check of the wetting action of the fog on the test insulator may be required.

To this effect, a dummy insulator consisting of a string of at least two units of the standard cap and pin type of table B.1 contaminated at the *SDD* value equal to 0,07 mg/cm<sup>2</sup> shall be put unenergized in the test chamber, in place of the test insulator, at the same average height from the floor. While the fog generator is working as in a real test, the current flowing through the wet layer of the dummy insulator is measured according to the procedure given in 16.1. The increase of the layer conductance in time shall be monitored and compared with the reference curve given in figure D.1. If necessary, a re-adjustment of the fog input rate shall be carried out to ensure that the measured curve matches the reference one.

#### D.4 Fog input in the test chamber

The fog shall be produced by steam generated by boiling water in open tanks or by steam admitted at low velocity through large diameter spray nozzles. The fog input in the test chamber shall be allowed only after the steam generation has reached its steady rate. Therefore, when the steam is produced by tanks, they shall be kept covered until the water inside reaches boiling point.

The insulator shall be positioned so that the visible fog surrounds it as uniformly as possible.

The temperature rise in the test chamber, measured at the height of the test object, shall not exceed 15 K by the end of the test.

#### D.5 Minimum duration of the withstand test

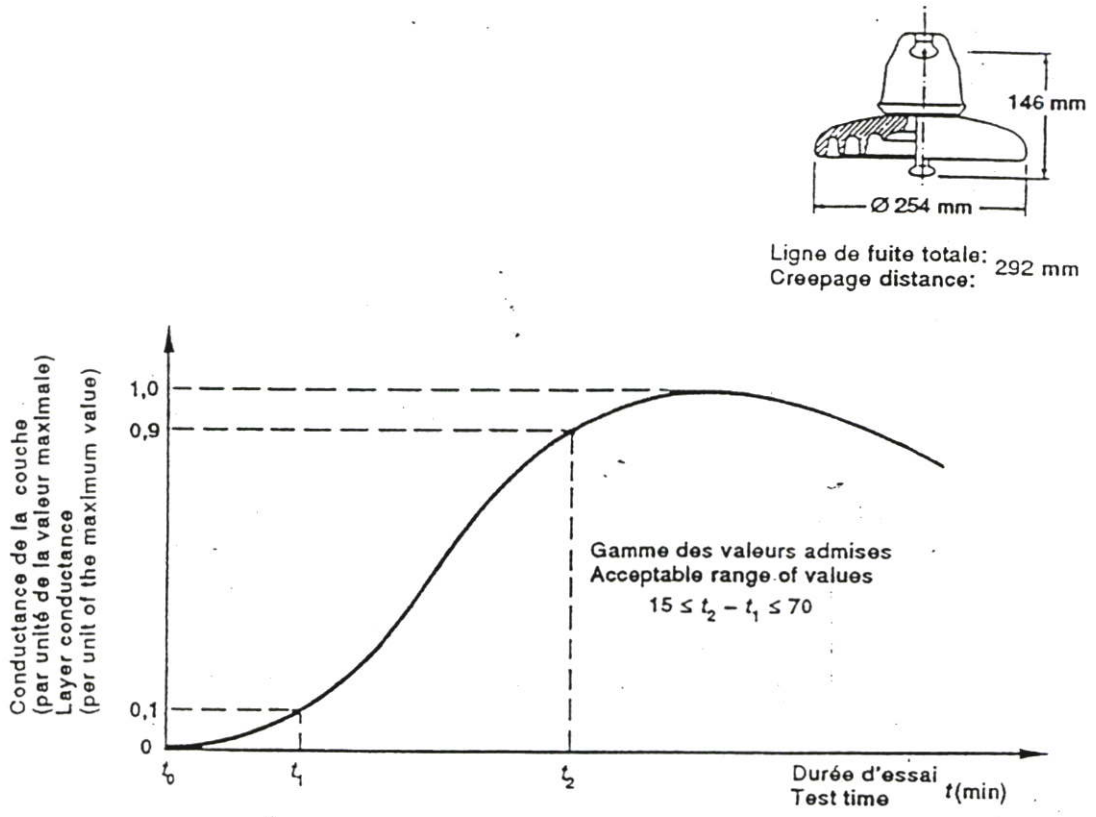
A direct evaluation of the minimum time a test shall last to be considered as a withstand test, can lead in some cases to times shorter than prescribed in 18.2. To this effect, measurements of the peaks of the surge current on the energized test insulator shall be performed during the test. After the maximum peak is reached, the surge current diminishes owing to the washing of the layer in progress after its wetting. When the current peaks have decreased to values permanently lower than 70 % of the maximum peak recorded, the withstand of the insulator is definitive and the test can be stopped.

#### D.6 Evaluation of the reference salt deposit density (*SDD*)

The pollution layer shall be removed completely from the chosen area of the insulator. To this effect the area shall be wiped at least three consecutive times.

As an indication, 2-4 litres of demineralized water per square metre of the cleaned surface can be used for dissolving the collected deposit. The effectiveness of the removal operation can be checked by making successive measurements of the residual deposit.

Every contaminating practice leads to some difference in the *SDD* values measured separately, on the upper and lower surfaces of the insulator. This difference is affected both by the insulator shape and the type of the contaminating suspension (see clause 13). It is suggested that the ratio between a local measurement of *SDD* and that on the whole area of the insulator be checked as lying in the range 0,7-1,3.



CEI-IEC 211191

Figure D1 – Contrôle de l'humidification par le brouillard à base de vapeur: enregistrement de la conductance de la couche pendant l'essai sur l'isolateur témoin (type standard du tableau B.1)

Control of the wetting action of the steam fog: layer conductance recording during the test on the chosen dummy insulator (standard type of Table B.1)

**ภาคผนวก ข**

มาตรฐาน ไออีซี 815 ( IEC 815 Standard )

# IEC 815 Guide for the selection of insulators in respect of polluted condition

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION  
IEC REPORT

Publication 815  
Première édition — First edition  
1986

---

Guide pour le choix des isolateurs  
sous pollution

---

Guide for the selection of insulators in respect  
of polluted conditions

---



© CEI 1986

Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

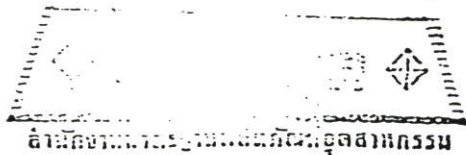
3, rue de Varembe  
Genève, Suisse

Code prix 24  
Price code

For price, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue

## CONTENTS

	Page
FOREWORD . . . . .	5
PREFACE . . . . .	5
 Clause	
1. Scope . . . . .	7
2. Object . . . . .	7
3. Pollution severity levels . . . . .	11
4. Relation between the pollution level and the specific creepage distance . . . . .	13
5. Application of the "specific creepage distance" concept . . . . .	13
5.1 Parameters characterizing the profile . . . . .	15
5.2 Influence of the position of insulators . . . . .	15
5.3 Influence of the diameter . . . . .	15
6. Determination of the creepage distance . . . . .	17
7. Evaluation of pollution severity . . . . .	17
 APPENDIX A — Example of a questionnaire to collect information on the behaviour of insulators in polluted areas . . . . .	21
APPENDIX B — Greasing and washing . . . . .	25
APPENDIX C — Relation between pollution levels and artificial pollution tests . . . . .	29
APPENDIX D — Parameters characterizing the insulator profile . . . . .	31



000573  
12 พ.ย. 2530

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## GUIDE FOR THE SELECTION OF INSULATORS IN RESPECT OF POLLUTED CONDITIONS

### FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

### PREFACE

This report has been prepared by IEC Technical Committee No. 36: Insulators.

The text of this report is based upon the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting	Two Months' Procedure	Report on Voting
36(CO)64	36(CO)66	36(CO)67	36(CO)68

Further information can be found in the relevant Reports on Voting indicated in the table above.

*The following IEC publications are quoted in this report:*

- Publications Nos. 71-2 (1976): Insulation Co-ordination,  
Part 2: Application Guide.
- 273 (1979): Dimensions of Indoor and Outdoor Post Insulators and Post Insulator Units for Systems with Nominal Voltages Greater than 1 000 V.
- 305 (1978): Characteristics of String Insulator Units of the Cap and Pin Type.
- 433 (1980): Characteristics of String Insulator Units of the Long Rod Type.
- 507 (1975): Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be Used on A.C. Systems.
- 720 (1981): Characteristics of Line Post Insulators.

## GUIDE FOR THE SELECTION OF INSULATORS IN RESPECT OF POLLUTED CONDITIONS

---

### 1. Scope

This guide is mainly applicable to three-phase systems up to 525 kV (phase-to-phase). For higher voltages the possible non-linear performance of insulators is still under study.

This guide is applicable to outdoor ceramic and glass insulators, used in a.c. systems, of the following types :

- long-rod and traction line insulator ;
- cap and pin insulator ;
- pedestal type post and rigid pin insulator ;
- substation and line post insulator ;
- hollow insulator ;
- bushing.

This guide cannot directly be used for special types of insulators such as insulators with conductive glaze, or covered, during the manufacturing, with any insulating material, for surge arresters and also for longitudinal insulation for open circuit-breakers. This guide does not deal with radio interference voltage, television interference voltage and audible noise, the intensity of which may be increased on some polluted insulators.

### 2. Object

The performance of insulators in polluted conditions has been the subject of many studies that permit the specification of the required insulation when the site pollution is known, or by experience of insulator performance in the same region which has been operating at the same or at a different system voltage. The approach based on laboratory simulation of natural pollution consists consequently of the following steps :

- 1) evaluation of type and severity of the pollution at the site ;
- 2) specification of a laboratory test as representative of the pollution of the site as possible (in particular, see IEC Publication 507 : Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be Used on A.C. Systems) ;
- 3) selection of insulators which would show a good behaviour under this test.

This method of selection and specification of the required insulation should be adopted whenever circumstances permit.

Obviously, this approach has some limitations, for instance, when a natural site cannot be represented in a satisfactory way by an artificial pollution test in the laboratory.

The aim of the present guide is to give, on the basis of the experience in service and numerous test results in naturally and artificially polluted conditions, *simple general rules that should assist in choosing the insulator which should give satisfactory performance under polluted conditions.*

These rules are essentially based upon *minimum creepage distance* requirements associated with a few other geometrical parameters, which generally do not limit the design of the insulator itself. They provide an easily accomplished way to choose insulators based on the predicted severity of the site where these insulators are to be installed. The above requirements are based on insulators having an acceptable risk of flashover when operating under such polluted conditions.

*Note.* — Suitable testing carried out in the laboratory or direct experience obtained in natural conditions may allow the minimum creepage distances specified in this guide to be reduced (for instance, for insulators specially designed for polluted conditions).

This guide describes the method of insulator selection by :

- evaluating qualitatively the severity of the pollution of the site (see Clause 4, Table I and Appendix A);
- choosing insulator dimensions with regard to the specific nominal creepage distance (Table II) within the limits stated in Clause 5.

In special cases, washing or greasing of insulators can be used (see Appendix B).

The guide also indicates, by way of information :

- different methods for measuring the pollution severity that make it possible to check, or to know with greater accuracy, the actual pollution severity of a site, while bearing in mind that valid information often calls for several years of measurements (see Clause 7);
- relations between pollution levels and artificial pollution tests (see Appendix C).

## 3. Pollution severity levels

For the purposes of standardization, four levels of pollution are qualitatively defined, from light pollution to very heavy pollution.

Table I gives, for each level of pollution, an approximate description of some typical corresponding environments. Other extreme environmental conditions exist which merit further consideration, e.g. snow and ice in heavy pollution, heavy rain, arid areas.

*Note.* — This table is intended to replace Table I of I E C Publication 71-2 : Insulation Coordination, Part 2 : Application Guide.

TABLE I

Pollution level	Examples of typical environments
I - Light	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Areas without industries and with low density of houses equipped with heating plants</li> <li>— Areas with low density of industries or houses but subjected to frequent winds and/or rainfall</li> <li>— Agricultural areas <sup>1)</sup></li> <li>— Mountainous areas</li> </ul> <p><u>All these areas shall be situated at least 10 km to 20 km from the sea and shall not be exposed to winds directly from the sea <sup>2)</sup></u></p>
II - Medium	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Areas with industries not producing particularly polluting smoke and/or with average density of houses equipped with heating plants</li> <li>— Areas with high density of houses and/or industries but subjected to frequent winds and/or rainfall</li> <li>— Areas exposed to wind from the sea but not too close to the coast (at least several kilometres distant) <sup>2)</sup></li> </ul>
III - Heavy	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Areas with high density of industries and suburbs of large cities with high density of heating plants producing pollution</li> <li>— Areas close to the sea or in any case exposed to relatively strong winds from the sea <sup>2)</sup></li> </ul>
IV - Very heavy	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Areas generally of moderate extent, subjected to conductive dusts and to industrial smoke producing particularly thick conductive deposits</li> <li>— Areas generally of moderate extent, very close to the coast and exposed to sea-spray or to very strong and polluting winds from the sea</li> <li>— Desert areas, characterized by no rain for long periods, exposed to strong winds carrying sand and salt, and subjected to regular condensation</li> </ul>

<sup>1)</sup> Use of fertilizers by spraying, or the burning of crop residues, can lead to a higher pollution level due to dispersal by wind.

<sup>2)</sup> Distances from sea coast depend on the topography of the coastal area and on the extreme wind conditions.

#### 4. Relation between the pollution level and the specific creepage distance

For each level of pollution described in Table I, the corresponding minimum nominal specific creepage distance, in millimetres per kilovolt (phase-to-phase) of the highest voltage for equipment is given in Table II. This table is intended to replace Table II of IEC Publication 71-2.

Experience has shown that the criterion of "minimum specific creepage distance", which implies linearity under pollution between withstand voltage and creepage distance, applies to most insulators used on existing systems.

Some insulators specially shaped for particular kinds of pollution may not satisfy these conditions even though they perform satisfactorily in service.

TABLE II

Pollution level	Minimum nominal specific creepage distance <sup>1)</sup> (mm/kV <sup>2)</sup> )
I - Light	16
II - Medium	20
III - Heavy	25
IV - Very heavy	31

<sup>1)</sup> For the actual creepage distance, the specified manufacturing tolerances are applicable (see IEC Publication 273: Dimensions of Indoor and Outdoor Post Insulators and Post Insulator Units for Systems with Nominal Voltages Greater than 1 000 V, IEC Publication 305: Characteristics of String Insulator Units of the Cap and Pin Type, IEC Publication 433: Characteristics of String Insulator Units of the Long Rod Type, and IEC Publication 720: Characteristics of Line Post Insulators).

<sup>2)</sup> Ratio of the leakage distance measured between phase and earth over the r.m.s. phase to phase value of the highest voltage for the equipment (see IEC Publication 71-1).

Notes 1. — In very lightly polluted areas, specific nominal creepage distances lower than 16 mm/kV can be used depending on service experience. 12 mm/kV seems to be a lower limit.

2. — In the case of exceptional pollution severity, a specific nominal creepage distance of 31 mm/kV may not be adequate. Depending on service experience and/or on laboratory test results, a higher value of specific creepage distance can be used, but in some instances the practicability of washing or greasing (see Appendix B) may have to be considered.

#### 5. Application of the "specific creepage distance" concept

In order to successfully apply the "specific creepage distance" concept, certain dimensional parameters characterizing the insulator shall be taken into account.

These parameters, based on service experience and on laboratory tests, mainly relate to the shed shape or to the profile of the insulator, but also to the diameter and the position in service of the insulator.

The following parameters are not intended to limit the future development of insulator design. They simply recommend certain limits (indicated in Appendix D) which must be interpreted flexibly in order to provide a high probability of satisfactory performance in service.

Based on past experience the important parameters which have to be taken into account are:

### 5.1 Parameters characterizing the profile (see Appendix D)

The profile of an insulator is characterized by the following parameters:

- minimum distance,  $c$ , between sheds;
- ratio  $s/p$  between spacing and shed overhang;
- ratio  $l/d$  between creepage distance and clearance;
- alternating sheds (see Figures 2, page 19 and D3b, page 37);
- inclination of sheds;
- parameters characterizing the entire insulator:
  - creepage factor C.F.
  - profile factor P.F.

Appendix D gives the definition of these parameters and an indication of their value.

### 5.2 Influence of the position of insulators

There is normally some change in the pollution performance of insulators designed for use in the vertical position when they are used in an inclined or horizontal position. Generally the change is for an improvement in performance, but in certain cases a reduction may result, due for example to the cascade effect of heavy rain.

Unless specific data showing significantly improved performance is available, any change in performance due to position should be neglected.

*Note.* - If insulators are designed for use in an inclined or horizontal position, the performance under polluted conditions can be checked by laboratory or field tests in the position for which they are designed.

### 5.3 Influence of the diameter

Various laboratory tests appear to indicate that the pollution performance of post insulators and hollow insulators decreases with increasing average diameter.

The following values for  $k_D$  are proposed,  $k_D$  being a factor to increase the creepage distance with average diameter  $D_m$  in millimetres.

- average diameter  $D_m < 300$  mm:  $k_D = 1$
- $300 \leq D_m \leq 500$  mm:  $k_D = 1.1$
- $D_m > 500$  mm:  $k_D = 1.2$

However, these values may differ according to the origin of different results (field results or laboratory tests). This factor should therefore be used with caution.

For a given profile, the average diameter  $D_m$  is given by:

$$D_m = \frac{\int_0^{l_i} D(l) dl}{l_i}$$

where:

$l_i$  is the total creepage distance of the insulator

$D(l)$  is the value of the diameter at a creepage distance  $l$ , measured from one electrode

The above formula may be approximated in general by the following simple relations :

1) regular sheds 
$$D_m = \frac{D_c + D_i}{2} \quad (\text{Figure 1, page 19}),$$

2) alternating sheds 
$$D_m = \frac{D_{c1} + D_{c2} + 2D_i}{4} \quad (\text{Figure 2, page 19}).$$

## 6. Determination of the creepage distance

The minimum nominal creepage distance of an insulator situated between phase and earth is determined, according to the pollution level of the site, by the relation :

minimum nominal creepage distance = minimum specific creepage distance (Table II)  $\times$  highest system voltage phase-to-phase for the equipment  $\times k_D$

where:

$k_D$  is the correction factor due to diameter (see Sub-clause 5.3)

If insulators are to be used between phases (phase-spacers for instance), the creepage distance should be multiplied by  $\sqrt{3}$  (for a three-phase system).

## 7. Evaluation of pollution severity

The application of this guide is directly related to the knowledge of the pollution severity of the site where the insulators are to be installed.

The evaluation of the pollution severity can be made with an increasing degree of confidence :

- qualitatively from indications given in Table I,
- from information on the behaviour of insulators from lines and substations already in service on that site (see Appendix A), for evaluation by experts in this field,
- from measurements *in situ*.

For measurements *in situ*, different methods are generally used. They are :

- 1) volume conductivity for the pollutant collected by means of directional gauges ;
- 2) Equivalent Salt Deposit Density on the insulator surface (ESDD method) ;
- 3) total number of flashovers of insulator strings of various lengths ;
- 4) surface conductance of sample insulators ;
- 5) leakage current of insulators subjected to service voltage (highest current values during subsequent time intervals,  $I_w$ ).

The first two methods do not require expensive equipment and can be easily performed. The volume conductivity method gives no direct information by itself on the frequency and on the [ the contamination events on a natural site. The ESDD method characterizes the pollution severity of the site. Information on wetting shall be separately obtained.

The accuracy of these methods depends upon the frequency of measurement. However, for the ESDD method, an automatic measuring system has been developed and therefore pollution severity can be measured continuously, in order to find, for example, the suitable timing of washing.

The method based on total flashovers needs expensive test facilities. Reliable information can be obtained only for insulators having a length close to the actual length and flashing over at a voltage near the operating voltage.

The last two methods which need a power source and special recording equipment have the advantage that the effects of pollution are continuously monitored. These techniques have been developed for assessing the pollution rate and the results, when related to test data, are used to indicate that the pollution is still at a level known to be safe for operational service or whether washing or re-greasing is required.

Note. — For more information on these different methods see "Electra" No. 64 - May 1979, page 101 and the following.

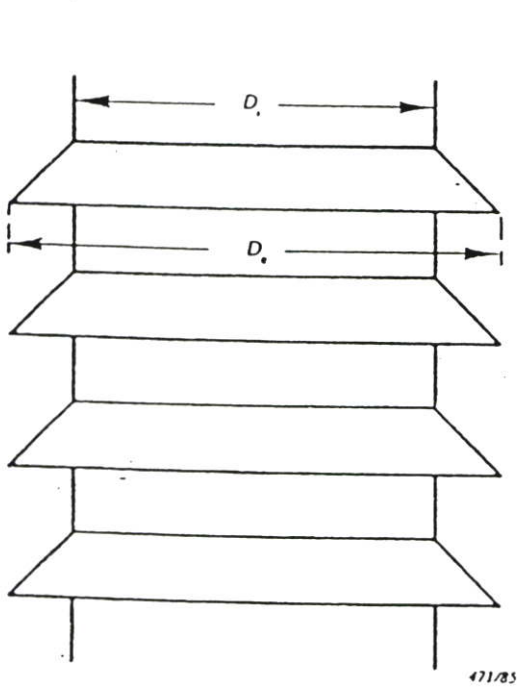


FIG. 1. — Regular sheds.

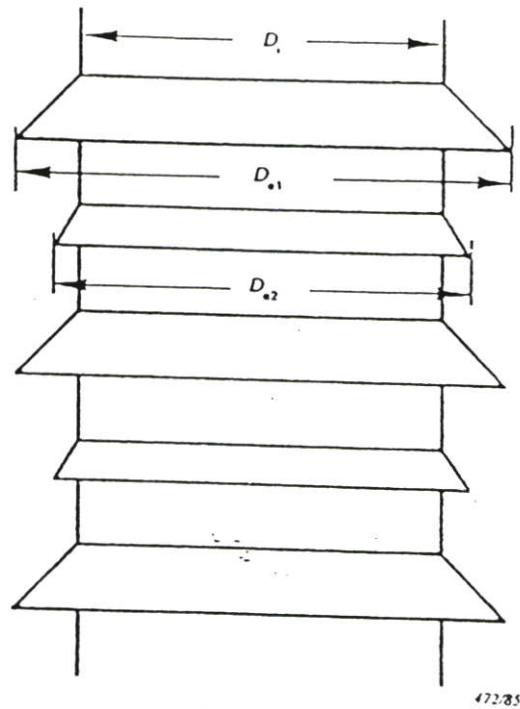


FIG. 2. — Alternating sheds.

## APPENDIX A

EXAMPLE OF A QUESTIONNAIRE TO COLLECT INFORMATION  
ON THE BEHAVIOUR OF INSULATORS IN POLLUTED AREAS

Company :	Country :
Identification of project and/or location : Line or substation :	
Person to consult for complementary information, address, telex, telephone :	

## A1. General information

- Nominal voltage of the system and highest voltage for equipment
- Date of construction
- Type of system
- Maintenance (not involving changes of insulator)
- *For overhead lines*
  - Type of tower (sketch)
  - Number of circuit
  - Ground clearance of string
  - Type of insulator sets
  - Insulator protective fittings
- *For substations*
  - Date of energizing
  - Cleaning — yes or no — frequency...
  - Washing — yes or no — frequency...
  - Greasing — yes or no — frequency...
  - Type of apparatus :
    - circuit-breaker
    - disconnecter
    - instrument transformer
    - lightning arrester
    - bus-bar insulator
  - Clearance between base of insulator and ground

## A2. Information on the site

- Map of areas crossed and routing of the line
- For polluted areas only, the different climatic zones crossed by the line (mark them on the map)
- For substations, place, orientation and altitude

## A3. Information on weather conditions

- Type of climate : temperate, tropical, equatorial, continental...
- Time without rainfall, in months
- Annual rainfall, in millimetres
- Dominant wind : direction, average speed in kilometres per hour
- Dew : sometimes, often, never
- Fog : sometimes, often, never

## A4. Information on pollution

For example :

- Seaborne pollution (high percentage of salt) — small amount of insoluble matter
- Saline pollution other than coastal — small amount of solids
- Sand-based pollution or ground dust (e.g. desert...)
- Industrial pollution with large amounts of solid deposits (except cement)
- Industrial pollution with large amounts of cement
- Chemical industrial pollution (gas, smoke...)
- Mixed pollution (indicate in this case the main components, for example for coastal cement factories)
- ...

## A5. Data on insulation

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- For overhead lines</li> <li>- Position of string           <ul style="list-style-type: none"> <li>• vertical (suspension)</li> <li>• horizontal (tension)</li> <li>• angle (in degrees)</li> </ul> </li> <li>- Number of units per string</li> <li>- Type of insulator (drawing)</li> <li>- Spacing</li> <li>- Creepage distance of unit</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- For substations</li> <li>- Type of insulator           <ul style="list-style-type: none"> <li>• post insulator (solid core)</li> <li>• pedestal insulator</li> <li>• bushing</li> <li>• hollow insulator</li> </ul> </li> <li>- Profile and spacing of shed (give details)</li> <li>- Total creepage distance</li> </ul> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
- Indicate any modification in the initial insulation

## A6. Schedule of incidents

- Date and time
- Situation of the tower (for line) and place of apparatus in substation
- Critical meteorological conditions at the moment of incidents :
 

<ul style="list-style-type: none"> <li>• relative humidity</li> <li>• rain</li> <li>• drizzle</li> <li>• fog</li> <li>• temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• storm</li> <li>• wind (direction, speed)</li> <li>• time between last rainfall and incident</li> <li>• other</li> </ul>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
- Type of incident :
  - flashover
  - heavy corrosion of metal parts
  - punctured dielectric
  - visible damage to dielectric
  - erosion or tracking
- For a string of insulators, place of damaged units in the string
- Comments of the incident indicating any special circumstances.

## APPENDIX B

### GREASING AND WASHING

In exceptional cases, pollution problems cannot be solved economically by a good choice of the insulator. For instance, in areas having very severe contamination or low annual rainfall, insulator maintenance may be required. This can also occur when the environment of an already built substation (or line) changes due to new polluting industries.

Maintenance normally takes one or more of the following forms :

- periodic hand wiping on de-energized installation or dry cleaning either energized or de-energized ;
- periodic coating with grease compounds ;
- periodic washing, either energized or de-energized.

#### a) Greasing

Grease compounds used for coating insulators are mainly silicone products or hydrocarbons. The thickness of the applied layer of grease depends on the type of grease and on the degree of pollution ; generally, for the silicone based compounds it is about 1 mm and for hydrocarbon compounds can reach some millimetres.

This type of application requires regular maintenance for removing the grease and recoating and is expensive. It should be pointed out that the greased insulators lose most of their properties of self-cleaning through the rain or through the wind and that under certain conditions of heavy pollution the grease can damage the ceramic or the glass.

The frequency of cleaning and regreasing ranges from some months to some years, depending upon the degree of contamination and the weather conditions. An optimization of these operations shall be reached by a check of the conditions of the grease, taking into account the accumulation rate of the pollution content in the grease and the ageing of the grease itself.

#### b) Washing

There are two main methods for the washing of insulators to remove pollution :

- by fixed sprays ;
- by using a manually controlled portable jet.

The frequency of washing should be such as to avoid significant accumulation of pollution. Thus the objective is to keep the insulators in as clean a condition as possible.

Insulator washing with fixed, automatic sprays is an effective and reliable method of combating pollution, particularly when the deposit rate is high. This technique has high capital cost and low running cost.

Portable jet washing equipment operates under the direct control of suitably trained persons and can be used at more than one site. It has low capital cost and high running cost. Some safety precautions are necessary.

Both systems require :

- a) a stored supply of water of adequate capacity and suitable low conductivity. Town mains water may be suitable for washing in some cases ;
- b) special nozzles to ensure that the wash water breaks into droplets ;
- c) precautions to reduce the risk of water being blown onto unwashed insulators by strong winds.

Where the pollution deposit rate is high, a pollution detector is desirable to initiate fixed washing or to call for a manual wash.

The effectiveness of washing is dependent on the design of the insulators, particularly the shape and spacing of sheds. In general, insulators of good pollution performance will wash well, particularly if the shed profile has good aerodynamic qualities.

*Note.* — For lightning arresters with internal gaps, special care should be taken to avoid flashover or explosion during washing.

## APPENDIX C

RELATION BETWEEN POLLUTION LEVELS  
AND ARTIFICIAL POLLUTION TESTS

These relations between pollution levels and artificial pollution tests on particular cap and pin and long-rod insulators are given only as examples, and cannot be used for type tests on line insulators. Neither should the given withstand severity be interpreted as a specification for post insulators and hollow insulators.

Table III gives for each pollution level the range of values which were obtained in some artificial pollution tests performed according to the test procedures described in IEC Publication 507 (1975).

Note. — The test procedures are being modified in the current revision of IEC Publication 507, especially those of the solid-layer methods. This may lead to values different from those given.

TABLE III

Specific creepage distance (see column 2, Table II)  (mm/kV)	Artificial pollution tests Severity withstand values at the phase-to-earth voltage		
	Salt fog method  (kg/m <sup>3</sup> )	Solid-layer methods	
		S. D. D. <sup>1</sup> (mg/cm <sup>2</sup> )	Layer conductivity (μS)
16	5 to 14	0.03 to 0.06	15 to 20
20	14 to 40	0.10 to 0.20	24 to 35
25	40 to 112	0.30 to 0.60	36
31	>160	—	—

<sup>1</sup> S. D. D. = Salt Deposit Density.

Tests

IEC 507

Salt Fog

Selective of Sodium Solution

light 7 kg/m<sup>3</sup>

medium 28 kg/m<sup>3</sup>

high 80 kg/m<sup>3</sup>

very high 160 kg/m<sup>3</sup>

light 0.025 mg/cm<sup>2</sup>

medium 0.1 mg/cm<sup>2</sup>

high 0.4 mg/cm<sup>2</sup>

## APPENDIX D

## PARAMETERS CHARACTERIZING THE INSULATOR PROFILE

These parameters are related to insulators installed in a vertical position. For other positions, see Sub-clause 5.2.

D1. Minimum distance  $c$  between sheds

$c$  is the minimum distance between adjacent sheds of the same diameter, measured by drawing a perpendicular from the lowest point of the outer rib of the upper shed to the shed below of the same diameter (Figure D1, page 36).

This distance is important in rainfall conditions to avoid bridging between two successive sheds. According to present knowledge, a value of  $c$  in the order of 30 mm or more fulfils this requirement.

For insulators having an overall length less than or equal to 550 mm, or for insulators with small shed overhang  $p$  (see Clause D2) ( $p \leq 40$  mm) a value of  $c$  in the order of 20 mm is acceptable.

Notes 1. —  $c$  is not applicable to pedestal-type post and pin-type insulators.

2. — For insulators with alternate sheds, see Clause D4.

D2. Ratio  $s/p$  between spacing and shed overhang

The ratio  $s/p$  describes the limitation on providing arbitrarily too high a leakage distance by either overdimensioning the shed overhang  $p$  or by unjustifiably increasing the number of sheds. The ratio is important for self-cleaning properties of insulators.

$s/p$  should be equal to or greater than 0.8. Field experience shows that this value can be reduced to 0.65 in the case of plain sheds (without ribs).

$s$  is the vertical distance between two similar points of successive sheds (spacing).

$p$  is the maximum shed overhang (i.e.  $p$  in Figures D3a and D3d, pages 37 and 38,  $p_1$  in Figure D3b, page 37 and  $p_2$  in Figure D3c, page 38).

D3. Ratio  $l_a/d$  between creepage distance and clearance

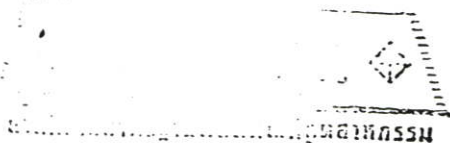
The ratio  $l_a/d$  describes the use of the creepage distance in order to avoid local short-circuiting and should be lower than 5. This ratio should be checked for the "worst case" on any section, for example, of the underside of an anti-fog insulator profile.

$d$  is the straight air distance measured between two points situated on the insulating part or between any point located on the insulating part and the other on a metal part.

$l_a$  is the part of the creepage path measured between the above two points.

## D4. Alternating sheds (see Figure D3b)

The difference ( $p_1 - p_2$ ) between two consecutive shed overhangs is important in rain conditions to avoid bridging between them.



$p_1$  is the shed overhang of the larger shed ;

$p_2$  is the shed overhang of the smaller shed.

This difference ( $p_1 - p_2$ ) should be in general greater than or equal to 15 mm.

#### D5. Inclination of sheds

The inclination of sheds is important for the self-cleaning properties. For the top of the shed, the minimum inclination of the shed ( $\alpha$ ) should be greater than 5° (see Figure D2, page 36).

No minimum angle is specified for the bottom part of the shed. However, if this bottom part is without ribs, a minimum inclination of 2° is advisable.

#### D6. Parameters characterizing the entire insulator

The insulators, as far as their performance under pollution is concerned, can be designed in different manners. When the pollution severity increases, a solution to satisfy the specific creepage concept is obviously to increase the length of the insulator while keeping the same shed profile.

*Note.* — When clean string insulator units are added to or replaced in a polluted insulator string, the complete string shall be cleaned before the line is re-energized.

However, this solution cannot be applied or may not be economical when the pollution severity is too high. Therefore it is possible to design insulators having different profiles suitable for the specified pollution severity.

The different parameters given above characterize local parts of a profile, but it is still necessary to characterize the entire insulator by the creepage factor (C.F.) and by the profile factor (P.F.). These two factors depend on the pollution severity.

C.F. has a theoretical and scientific meaning, while P.F. is an empirical quantity derived from experience. C.F. can be used to characterize the profile of all types of insulators, whereas P.F. is not applicable to cap and pin insulators (see Figure D3c, page 38) and pedestal post insulators (see Figure D3e, page 39).

##### D6.1 Creepage factor C.F.

The creepage factor, C.F., is equal to  $\frac{l_1}{S_1}$

where :

$l_1$  is the total creepage distance of an insulator, and

$S_1$  is the arcing distance, which is the shortest distance in air, outside the insulator, not considering arcing horns, between the metallic parts to which the voltage is normally applied

It is advisable to keep :

C.F.  $\leq$  3.50 for pollution levels I and II,

C.F.  $\leq$  4 for pollution levels III and IV.

*Note.* — If an insulator has a profile with a C.F. higher than the limit value recommended, the insulator profile may be used if experience in operation, or a laboratory test reproducing operation conditions, permits the assumption of good performance.

## D6.2 Profile factor P.F.

The P.F. is defined as the ratio of the simplified leakage distance to the actual insulating creepage distance measured between the two points which define the spacing  $s$ .

The simplified leakage distance is the sum of:

$2p + s$  for insulators in Figures D3a and D3d, pages 37 and 38,

$2p_1 + 2p_2 + s$  for insulators in Figure D3b, page 37,

$p$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ , and  $s$  having the definitions given above and shown in Figures D3.

Thus, P.F. is equal to:

$$\frac{2p + s}{l} \text{ for insulators in Figures D3a and D3d}$$

$$\frac{2p_1 + 2p_2 + s}{l} \text{ for insulators in Figure D3b}$$

$l$  being the creepage distance of the insulated leakage path measured between the two points which define  $s$ .

It is advisable to keep:

P.F. above 0.8 for pollution levels I and II,

P.F. above 0.7 for pollution levels III and IV.

*Note.* — If an insulator has a profile with a P.F. lower than the limit value recommended, the insulator profile may be used if, experience in operation, or a laboratory test reproducing operation conditions, permits assumption of good performance.

*General note.* — The protected part of the profile (protected creepage distance) should not be specified as a parameter characterizing a shed profile.

In effect, no general rules can be quantified because the degree to which a shed profile is "open" or "protected" depends mainly on:

- the different site conditions of contamination,
- the prevailing self-cleaning conditions,
- the position of the insulator (angle of inclination).

For example, for insulators used in vertical position in an area exposed to salt storms and frequent and intensive rain, "protected" profiles (either profiles with underribs or plain sheds of steep inclination) have proved to be useful.

On the other hand, for insulators used in an area with rare or low intensity rain or airborne contaminants, "open" (or aerodynamic) profiles seem to show good performance. In such cases, the creepage distance of underribs can be put out of action by being filled with contaminants.

Ces profils ne sont donnés qu'à titre indicatif.

The profiles are only indicative.

*Handwritten notes:*  
 f = bobbin diameter  
 p  
 s  
 c = d  
 l<sub>0</sub>

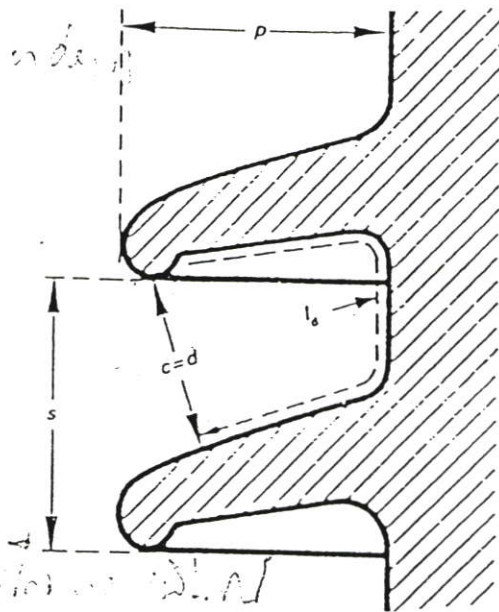


FIG. D3a. — Ailettes normales.  
Normal sheds.

*Handwritten notes:*  
 1) - ...  
 over the

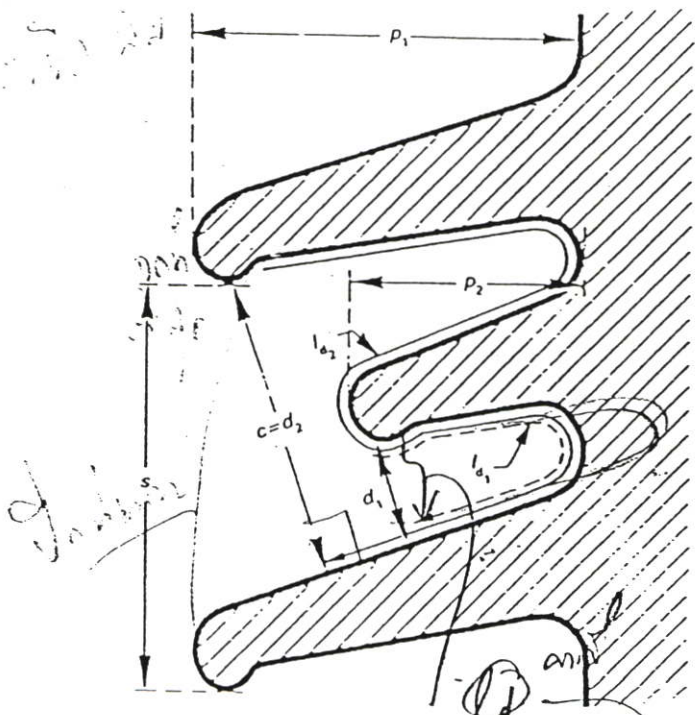


FIG. D3b. — Ailettes alternées.  
Alternating sheds.

*Handwritten notes:*  
 Ld < 5  
 d m  
 Ld < 5  
 d  
 local shading  
 Ld < 5 d  
 d = 5  
 Ld < 50 -  
 Ld < 30 -  
 c = d

*Handwritten notes:*  
 short r. winding  
 local short circuit

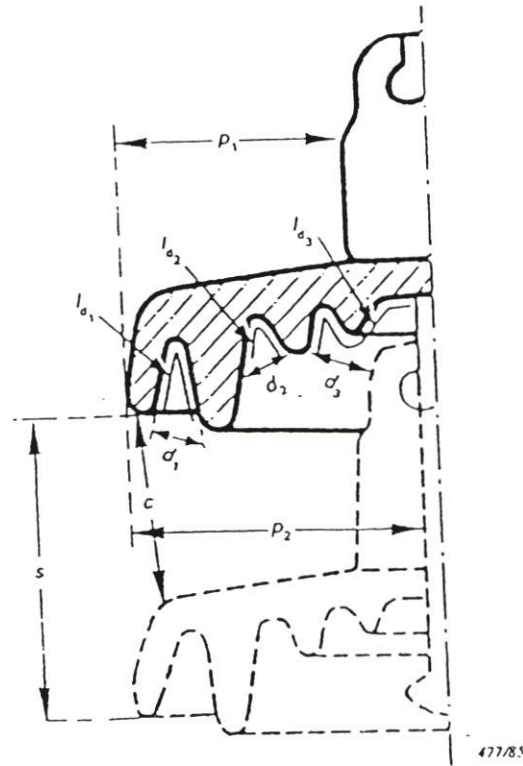


FIG. D3c. — Isolateur à capot et tige.  
Cap and pin insulator.

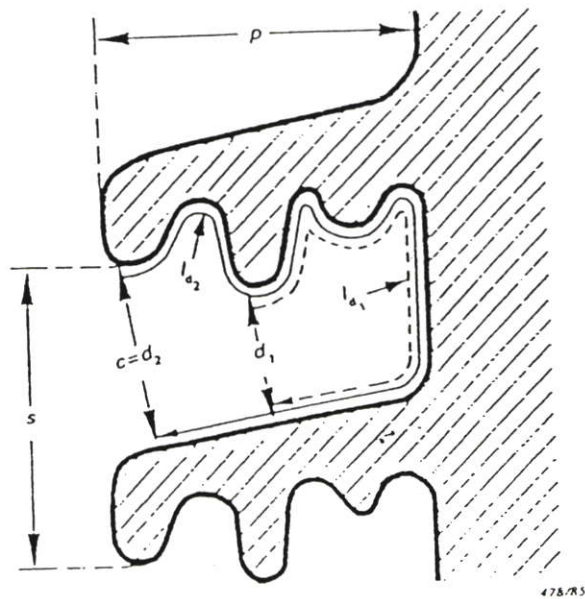
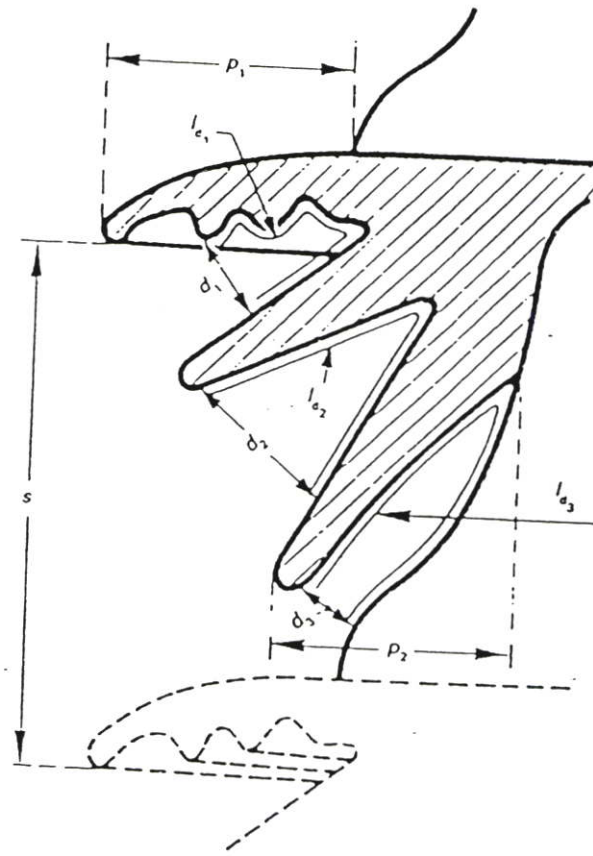


FIG. D3d. — Ailettes à ondulations.  
Underrib sheds

Ces profils ne sont donnés qu'à titre indicatif.

The profiles are only indicative.



479/85

FIG. D3e. — Support isolant à capot et embase.  
Pedestal type post insulator.



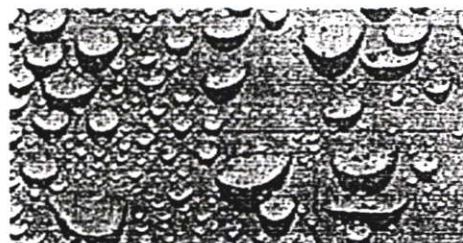
## ภาคผนวก ค

การแบ่งระดับของการเป็นหยคน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์  
( Hydrophobic Classification )

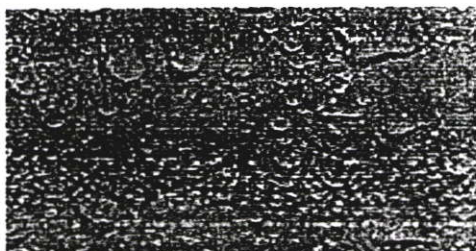
การแบ่งระดับของการเป็นหยดน้ำบนผิวฉนวนลูกถ้วยโพลีเมอร์ ( Hydrophobic Classification )  
ตามมาตรฐานประเทศ สวีเดน ( STRI )



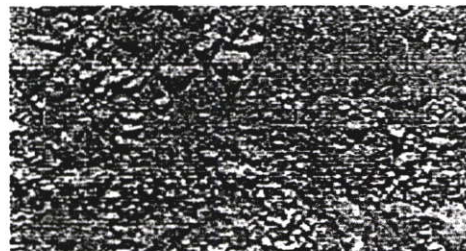
HC1



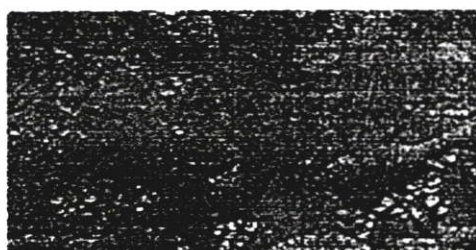
HC2



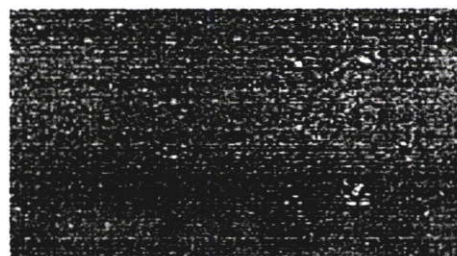
HC3



HC4



HC5



HC6

หมายเหตุ HC 7 จะเหมือนกับ HC 6 เพียงแต่ครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดของลูกถ้วยฉนวน

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [ 1 ] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “ Corona Inception Phenomena of Porcelain Insulators and A Comparison with Polymeric Insulators under Salt Fog Pollution in Thailand ”, **ICEE 2007** , Hong Kong . July 2007
- [ 2 ] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “ The Study of Ageing of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution in Thailand and A Comparison with Artificial Pollution”, **ICEE 2007**, Hong Kong. July 2007
- [ 3 ] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “The Hydrophobic of Polymeric Insulator under Dust Pollution and A Comparison with Artificial Pollution ”, **ECTI 2007** , Thailand . May 2007
- [ 4 ] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, “A Comparison of Corona Phenomena between Porcelain and Polymeric Insulators under Dust Pollution in Thailand d” , **ECTI 2007** , Thailand. May 2007

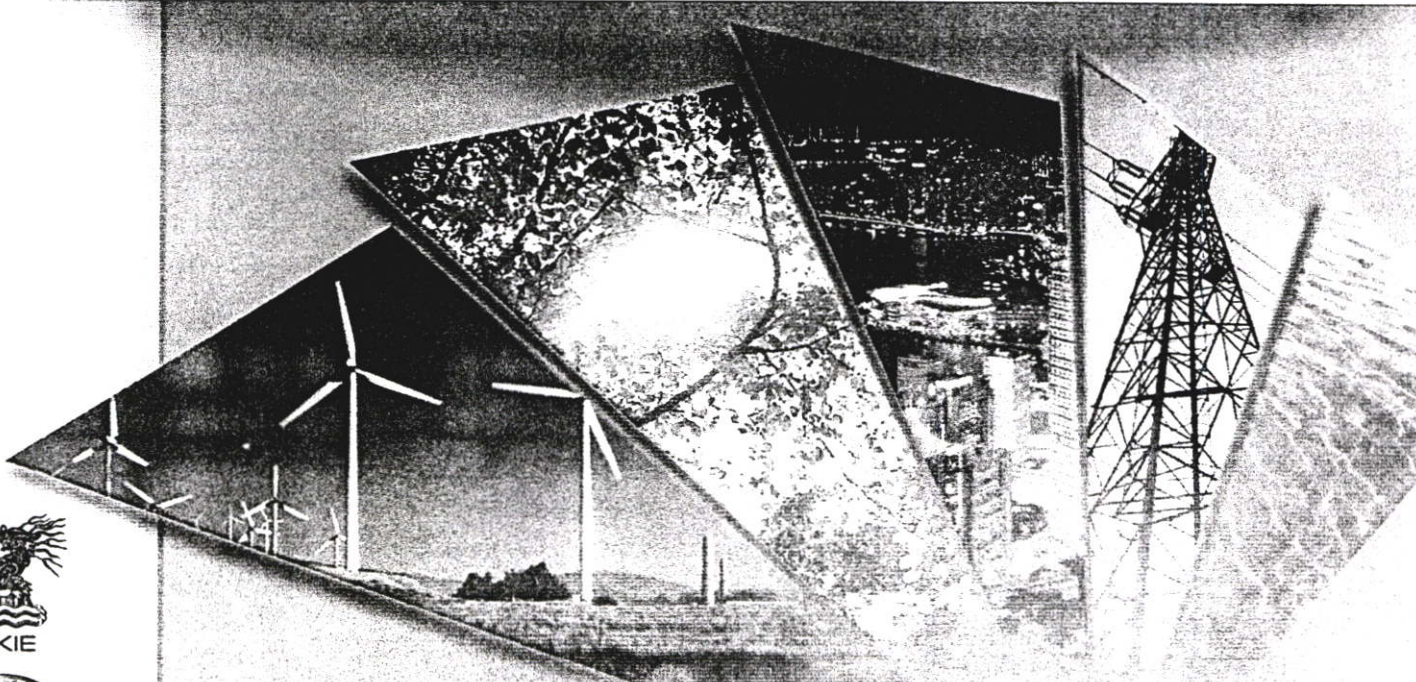


# Conference Handbook

The International Conference on  
**Electrical  
Engineering**

Intelligent  
Clean  
Efficient  
Electricity  
for the 21st Century with focus  
on Sustainability and Reliability

8-12 July 2007 • Hotel Nikko Hongkong



HKIE



CSEE



IEEJ



KIEE

**ORGANISED BY**

The Hong Kong Institution of Engineers (HKIE)

**CO-ORGANISED BY**

The Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE)

The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)

The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)

**SPONSORED BY**

CLP Power Hong Kong Limited  
The Hongkong Electric Co., Ltd.

CLP  中電

 港燈  
HK Electric

ICEE-331

**Title:** Research on Motor-drive Mechanism of High-voltage Circuit Breaker

**Author(s):** HUANG, Yulong SHAO, Shengnan WANG, Jingjun XU, Guozheng QIAN, Jiali

In this paper, a new type of motor drive operating mechanism of High Voltage Circuit Breakers (HVCB) based on techniques of power electronics and motor digital control has been studied. In this paper, the structure and the moving principle of operating mechanism for HVCB is analyzed and the control strategy for PMSM drive operating mechanism is described. *The simulations, calculations and actual tests all indicate that parameters of the drive-motor such as the rotational inertia, the output torque and the output power will have impact on the performance of the operating mechanism. The research work of this paper has shown that it is advisable to adopt motor for driving operating mechanism of HVCB and such mechanism can meet the requirements for opening and closing operation of HVCBs.*

ICEE-332

**Title:** Corona Inception Phenomena of Porcelain Insulators and A Comparison with Polymeric Insulators under Salt Fog Pollution in Thailand

**Author(s):** CHAISAENGSUKKUL, Apisit POTIVEJKUL, Siriwat PATTANADEJ, Norasage

The insulators used in electrical distribution system, particularly those in coastal environment, are exposed to salt vapor from sea water. Such condition would cause power interruption in electrical system and as a result, it would impact power system stability. This paper presents results of corona phenomena study on AC insulators for 33 kV system under Salt Fog Method of sea water from east coast of Thailand and a line solution with various salinity. Two types of insulator : porcelain insulator and polymeric insulator with alternating shed are used for testing. The test results show that corona inception voltage as well as leakage current of porcelain insulator when exposed with sea water are higher than that of polymeric insulators. When salinity levels of saline solutions are increased, corona inception voltage of porcelain insulators are slightly changed while corona inception voltage of polymeric insulators are decreased. Corona inception voltage of polymeric insulators are lower than that of porcelain insulators. When salinity levels of saline solutions are increased, leakage current of porcelain insulators are slightly decreased while leakage current of polymeric insulators are slightly changed. Leakage current of polymeric insulators are lower than porcelain insulators. In addition, when comparing corona phenomena with electric field by computerized simulation program, i.e. Finite element etc. the results show that the lowest part of both porcelain and polymeric insulators close to conductors have the highest electric field and it is also the position that corona phenomena occurred.

# Corona Inception Phenomena of Porcelain Insulators and A Comparison with Polymeric Insulators under Salt Fog Pollution in Thailand

**CHAISAENGSUKKUL, Apisit**

Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
[apisit@cpf.co.th](mailto:apisit@cpf.co.th)

**PATTANADEJ, Norasage**

Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
[norasage@yahoo.com](mailto:norasage@yahoo.com)

**POTIVEJKUL, Siriwat**

Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
[Kpsiriwa@kmitl.ac.th](mailto:Kpsiriwa@kmitl.ac.th)

## Abstract

*The insulators using in electrical distribution system particularly in coastal environment are exposed to salt vapor from sea water. Such condition would cause power interruption in electrical system and as a result, it would impact power system stability. This paper presents results of corona phenomena study on AC insulators for 33 kV system under Salt Fog Method of sea water from east coast of Thailand and saline solution with various salinity. Two types of insulator : porcelain insulator and polymeric insulator with alternating sheds are used for testing. The test results show that corona inception voltage as well as leakage current of porcelain insulators when exposed with sea water are higher than that of polymeric insulators.*

*When salinity levels of saline solutions are increased, corona inception voltage of porcelain insulators are slightly changed while corona inception voltage of polymeric insulators are decreased. Corona inception voltage of polymeric insulators are lower than that of porcelain insulators. When salinity levels of saline solutions are increased, leakage current of porcelain insulators are slightly decreased while leakage current of polymeric insulators are slightly changed. Leakage current of polymeric insulators are lower than porcelain insulators. In addition, when comparing corona phenomena with electric field by computerized simulation program, i.e. Finite element etc. the results show that the lowest part of both porcelain and polymeric insulators close to conductors have the highest electric field and it is also the position that corona phenomena occurred.*

## Keywords:

*Polluted insulator , artificial pollution*

## 1. INTRODUCTION

The AC insulators which are installed in the distribution system particularly near eastern sea coast or industrial area those located in eastern of Thailand are exposed to salt vapour and can be easily cause flashover. As a result, it can lead to cause power interruption to factory or end user which impact to stability of power system. The selection of proper insulators such as polymeric insulators to replace porcelain insulators has been studying for several years to solve this problem since polymeric insulator has its main advantage on hydrophobic properties and light weight. However, polymeric insulator to be used needs to be electrically tested to ensure its properties suits sea coast environment.

## 2. SALT FOG METHOD

When studying polluted insulators, it is generally referred IEC 507 standard. This standard recommends Salt Fog Method to simulate coastal condition. Sea water from eastern coast of Thailand was provided as well as saline solution with various salinity were prepared as solutions for Salt Fog Method. Three porcelain insulators and three polymeric insulators with alternating sheds were provided to carry out the test under Salt Fog Condition.

### 2.1. Salt Fog Chamber

Salt fog test chamber is fabricated as according to standard requirements. The dimension of chamber ( width x length x height ) is 4.0 x 8.0 x 4.5 m<sup>3</sup>. Two of four-nozzle spray columns are provided at both side of object test with distance of 3 metres each. System air pressure is approximately

7.0 bars while flow rate of solutions at each spray is 30 litres / hour.

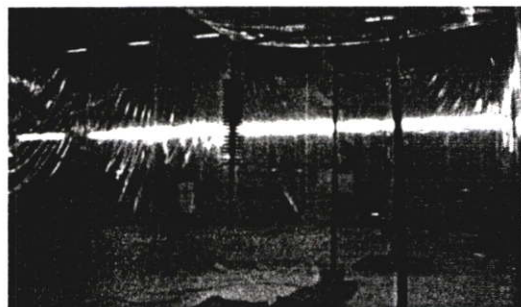
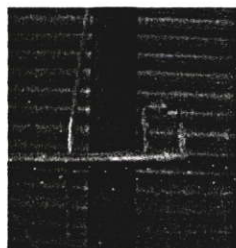


Fig. 1 Salt Fog Test Chamber

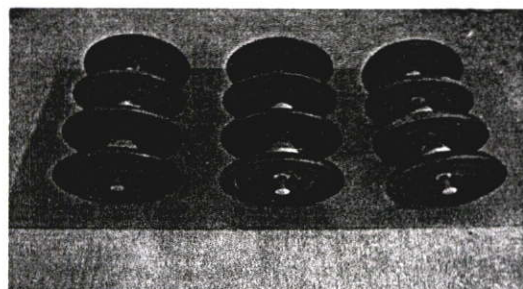


(a) Spray Columns

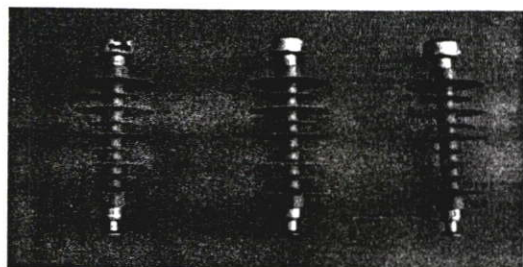


(b) Air and Solutions Nozzles

Fig. 2 Spray Columns & Nozzles



(a) Porcelain Insulators



(b) Polymeric Insulators

Fig. 3 Test Objects

## 2.2. Saline Solutions Preparation

Sea water was collected from eastern coast of Thailand in containers. Three samples of sea water were prepared for measuring of conductivity. The salinity of sea water is represented with SS. Four salinity values ( represented as S1, S2, S3, S4 ) of saline solutions for salt fog are selected for the test, i.e. small salinity, medium salinity, high salinity and very high salinity respectively. The values of S1, S2, S3, S4 are 7, 28, 80, 160 kg / m<sup>3</sup> respectively. These values can be prepared by blending sodium chloride having different quantity with clean water. Conductivity of these solutions can be measured by conductivity meter. The conductivity data of selected solutions including sea water at 20 °C are shown below :

Salinity Levels	Salinity ( kg / m <sup>3</sup> )	Conductivity ( S / m )	Remark
SS	N / A	4.11	Sea Water
S1	7	1.17	Small Salinity
S2	28	3.97	Medium Salinity
S3	80	9.88	High Salinity
S4	160	17.8	Very High Salinity

Table 1  
Salinity Levels and Conductivity of Solutions



Fig. 4 Conductivity Meter ( Type Inno Level 2 )

## 3. TEST PROCEDURE

Fig. 5 shows test arrangement under salt fog condition. After all equipment including test object ( porcelain insulator ) are set up, the test

begins. Solutions with small salinity is started to spray from both columns and test voltage is gradually applied to test object until corona phenomena can be detected by corona camera ( Fig. 6 ) In case no corona occurred, the maximum voltage is limited not exceed 70 kV. Then the test of second specimen of porcelain insulator is taken place. After three specimens are tested under small salinity. The consequential test of three polymeric insulators are carried out. After completion of test for small salinity of both porcelain and polymeric insulators. The medium salinity is then supplied.

The test is carried out with the same test procedure mentioned above for all salinity values including sea water. During each test, leakage current is measured and recorded at all applied voltage when corona phenomena occurred.

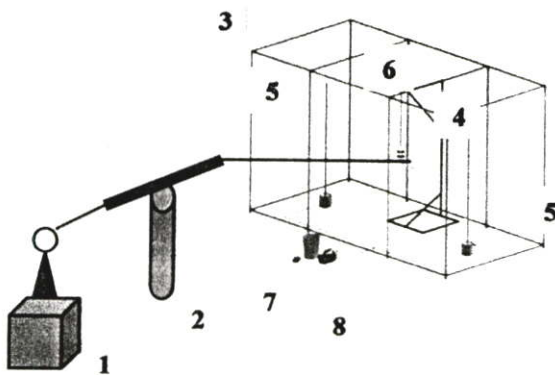


Fig 5 Test Arrangement

where

1. Testing Transformer Rated 5 kVA , 100 kV
2. Water Resistance
3. Test Chamber Dimension  $W \times L \times H = 4 \times 8 \times 4.5 \text{ m}^3$
4. Test Object ( Porcelain / Polymeric Insulator )
5. Spray Coulmns
6. Current Transformer
7. Solution Containers
8. Air Compressor



Fig. 6 Corona Camera ( Type Corocam II )

#### 4. TEST RESULTS AND ANALYSIS

The test result show corona phenomena of two types of insulator : porcelain and polymeric insulators. From Fig. 7, when salinity levels of saline solutions are increased, corona inception voltage of porcelain insulators are slightly changed while corona inception voltage of polymeric insulators are decreased. Corona inception voltage of polymeric insulators are lower than that of porcelain insulators.

From Fig. 8 , when salinity levels of saline solutions are increased, leakage current of porcelain insulators are slightly decreased while leakage current of polymeric insulators are slightly changed. Leakage current of polymeric insulators are lower than porcelain insulators.

In addition, corona inception voltage as well as leakage current of porcelain insulators when exposed with sea water are higher than that of polymeric insulators.

From Fig. 9 , corona phenomena which are occurred at the lowest part of both porcelain and polymeric insulators conform to computer simulation as shown in Fig. 10. The simulation was adopted by using Finite Element Laboratory or FEMLAB software, the proper type with its dimensions of insulators need to be provided as input data and conditions need to be defined, i.e. cleaned and polluted condition etc. In Fig. 10, it is shown the highest intensity of electric field located at lowest part of porcelain and polymeric insulators.

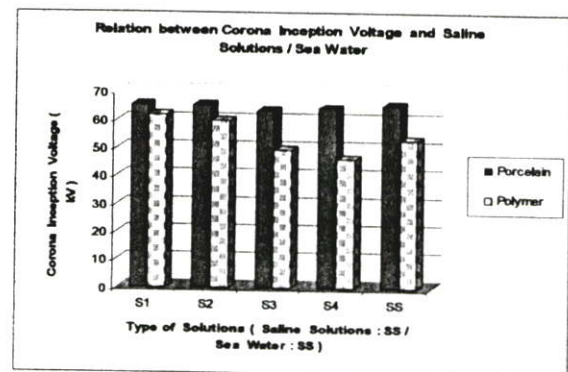


Fig. 7 Relation between Corona Inception Voltage (kV) and Saline Solutions / Sea Water of Porcelain and Polymeric Insulators

Where

- S1 : Saline Solutions with Small Salinity
- S2 : Saline Solutions with Medium Salinity
- S3 : Saline Solutions with high Salinity
- S4 : Saline Solutions with Very High Salinity
- SS : Sea Water

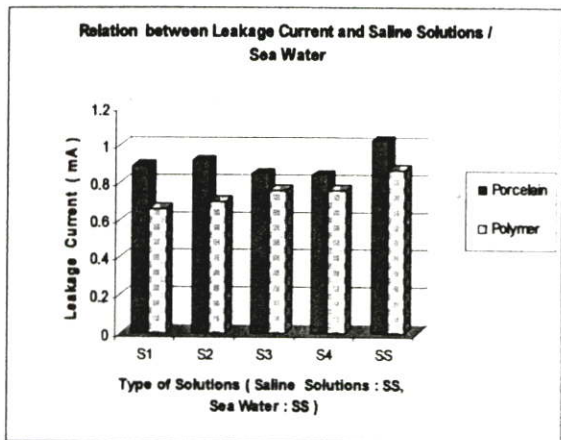


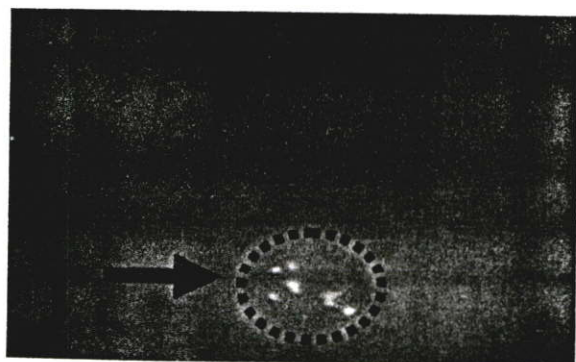
Fig. 8 Relation between Leakage Current (mA) and Saline Solutions / Sea Water of Porcelain and Polymeric Insulators

where

- S1 : Saline Solutions with Small Salinity
- S2 : Saline Solutions with Medium Salinity
- S3 : Saline Solutions with high Salinity
- S4 : Saline Solutions with Very High Salinity
- SS : Sea Water



( a )

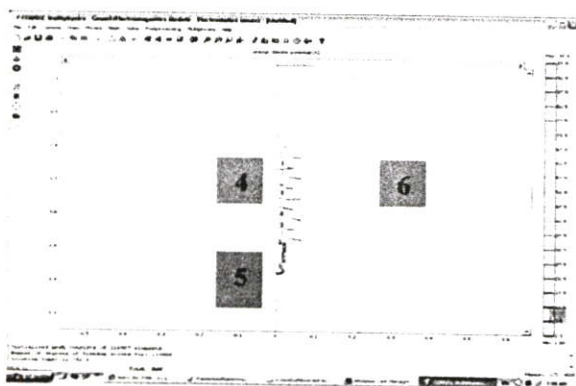


( b )

Fig. 9 Corona Inception Phenomena of (a) Porcelain Insulator and (b) Polymeric Insulator ( Arrow Signs Show Corona Phenomena Occurrence Points )



( a )



( b )

Fig. 10 Computer Simulation of (a) Porcelain and (b) Polymeric Insulator where

- 1 : Porcelain Insulator
- 2 : Highest intensity of electric field
- 3 : Lower intensity of electric field
- 4 : Polymeric Insulator
- 5 : Highest intensity of electric field
- 6 : Lower intensity of electric field

5. CONCLUSION

The test results show that corona inception voltage as well as leakage current of porcelain insulators when exposed with sea water are higher than that of polymeric insulators.

When salinity level of saline solutions are increased, corona inception voltage of porcelain insulators are slightly changed while corona inception voltage of polymeric insulators are decreased. Corona inception voltage of polymeric insulators are lower than that of porcelain insulators.

When salinity of saline solutions are increased, leakage current of porcelain insulators are slightly decreased while leakage current of polymeric

insulators are slightly changed. Leakage current of polymeric insulators are lower than porcelain insulators.

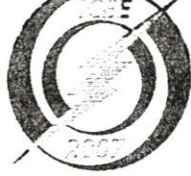
In addition, when comparing corona phenomena with electric field by computerized simulation program, i.e. Finite element etc. the results show that the lowest part of both porcelain and polymeric insulators close to conductors have the highest electric field and it is also the position that corona phenomena occurred.

#### Acknowledgements

The author would like to express thankfulness to Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Data Entry Co., Ltd, Department of Chemistry, Faculty of Science and High Voltage Laboratory, KMITL for relevant equipment and instrument.

#### References

- [1] STEPHEN A. SEBO, EDGAR P. CASALE, JOSE R. CEDENO, WIBAWA JOKRODIPONTO AND SHEIKH A. AKBAR, Review of Features of Fog Chamber at The Ohio State University for Polymer Insulator Evaluation, *IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, October 20-23, 1996, pp. 443-446
- [2] D. DEVENDRANATH, PRADEEPM. NIGRUDE, G.V. RAO R.S. SHIYAKUMARA ARADHYA, A. P. SUDHEER, N. S. MOHANRAO, HANNAKESHA VA, Investigations on Rain Fog Pollution Test, *IEE High Voltage Engineering Symposium*, 22 - 27 August 1999, Conference Publication, No. 467 @IEE, 1999, pp. 4.111.S25-4.114.S25
- [3] CHRIS S. ENGELBRECHT, RALF HARTINGS, SENIOR MEMBER IEEE, HELENA TUNELL, BJORN ENGSTROM, HARALD JANSSEN AND RAIMUND HENNINGS, Pollution Tests for Coastal Conditions on an 800 - kV Composite Bushing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No 3, July 2003, pp. 953 - 959.
- [4] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) PUBL. 507, Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems, Second Edition 1991-4.
- [5] WIBAWA TJOKRODIPONTO, STEPHEN A. SEBO, JOHN D. SAKICH, TIEBIN ZHAO, Simultaneous Electrical and Visual Measurements of Leakage Currents Along Polymer Insulators in Artificial Pollution Tests, *IEEE Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, May 25 -30, 1997, Seoul, Korea, pp. 738-741.
- [6] WANG SHAOWU, LIANG XIDONG, HUANG LENG CENG, Laboratory Study on Hydrophobicity and Pollution Flashover Properties of Polymer Insulators, *1999 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 723-726
- [7] AMORNCHAI CAR, Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage between HVAC and HVDC Insulator, *IPEC2005*, Singapore Nov. 2005



# Conference Handbook

The International Conference on

# Electrical Engineering

Intelligent

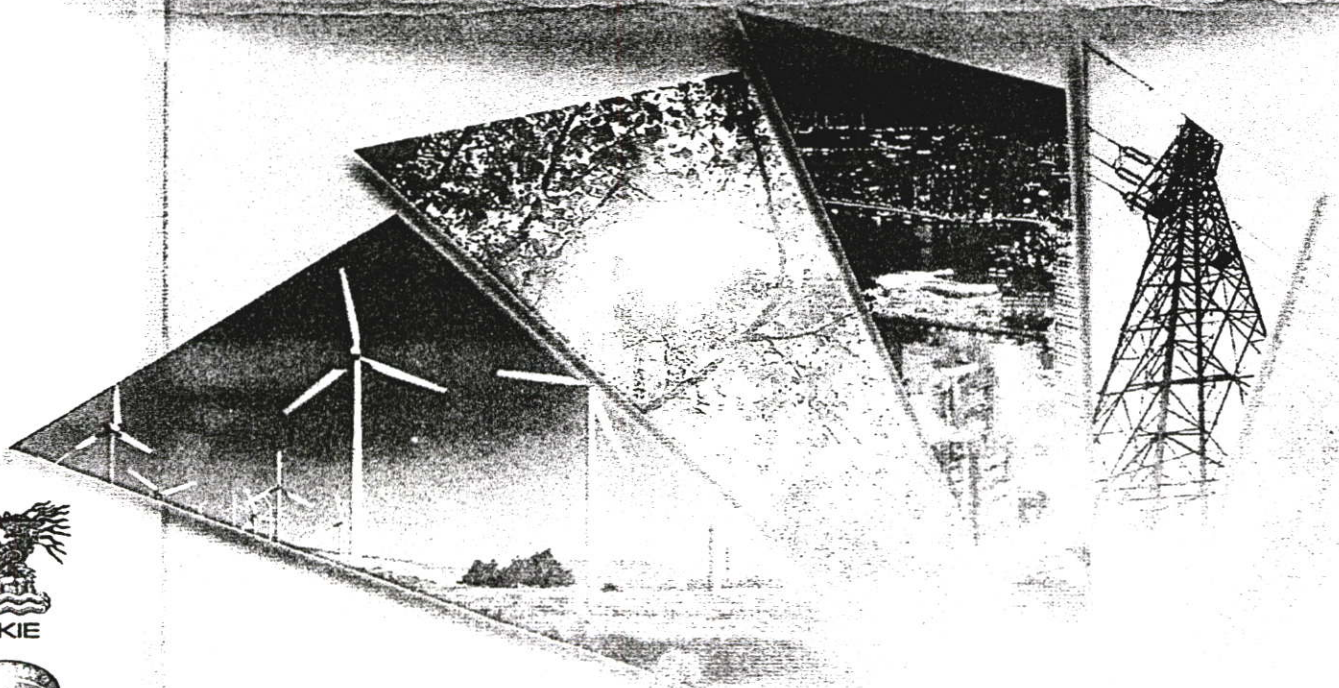
Clean

Efficient

Electricity

for the 21st Century with focus  
on Sustainability and Reliability

8-12 July 2007 • Hotel Nikko Hongkong



HKIE



CSEE



IEEJ



KIEE

**ORGANISED BY**

The Hong Kong Institution of Engineers (HKIE)

**CO-ORGANISED BY**

The Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE)

The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)

The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)

**SPONSORED BY**

CLP Power Hong Kong Limited

The Hongkong Electric Co., Ltd.

CLP 中電

港燈  
HK Electric

obtaining feasible schedules such as GMS problem related to power system planning and operation. In our paper, we find the optimal solution of the GMS problem within a specific time horizon using hybrid PSO algorithm, simple modification to the standard particle swarm optimization adding mutation operator of GA to solve the stagnation problem. Actual data obtained from the IEEE reliability test system (1996) including 32-generators are applicable to the GMS problem. From the result, we can conclude that the hybrid PSO is enough to look for the optimal solution effectively in the generating unit maintenance scheduling problem. It is also envisaged that hybrid PSO (HPSO) algorithm can be easily implemented for similar optimizations and scheduling problems in power system problems to obtain improved solutions.

#### ICEE-465

**Title:** The Study of Ageing of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution in Thailand and A Comparison with Artificial Pollution

**Author(s):** CHAISAENGSUKKUL, Apisit    POTIWETKUL, Siriwat    PATTANADEJ, Norasage

This paper presents results of properties of polymeric insulation study, e.g. ageing, hydrophobic which influence the electrical characteristic of polymeric insulator etc. when they are subjected to artificial polluted condition compared with natural pollution in Thailand. The test results show that the insulation resistance of polymeric insulation decreases when it was exposed to polluted condition such as saline solution no matter of any level of salinity, flour dust, animal feed dust or cement dust. When the duration of ageing is prolonged, the insulation resistance trends to be reduced. Moreover, the insulation resistance of polymeric insulator under 50°C atmospheric is slightly lower than that of 30°C. It is also found that hydrophobic properties of polymeric insulation under various salinity, i.e. small salinity, medium salinity and high salinity are still relatively remain its properties while hydrophobic properties under flour dust is partially maintain except the area covered with flour dust. However, hydrophobic properties will be lost when it exposed with feed dust and cement dust.

#### ICEE-466

**Title:** Catenary System Model using MTL Structure with Distributed Parameter

**Author(s):** KIM, Joorak    SHIM, Keon Bo    LEE, Changmu    KIM, Jung Hoon

AT fed power supply system is fed with twice voltage of other systems. Therefore, it is that AT system can be fed through longer distance than other systems. The catenary system is represented by impedance and lumped parameter in the circuit analysis. Therefore, the catenary system can often result in the inaccurate analysis. This Paper presents circuit model of catenary system in electrified railway system. The proposed model has MTL structure with distributed parameter.

# The Study of Ageing of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution in Thailand and A Comparison with Artificial Pollution

**CHAISAENGSUKKUL, Apisit**

Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
[apisit@cpf.co.th](mailto:apisit@cpf.co.th)

**POTIVEJKUL, Siriwat**

Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
[Kpsiriwa@kmitl.ac.th](mailto:Kpsiriwa@kmitl.ac.th)

**PATTANADECH, Norasage**

Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut ' Institute of Technology Ladkrabang  
[norasage@yahoo.com](mailto:norasage@yahoo.com)

## Abstract

*This paper presents results of properties of polymeric insulation study, e.g. ageing, hydrophobic which operate influence the electrical characteristic of polymeric insulator etc. when they are subjected by artificial polluted condition compared with natural pollution in Thailand.*

*The test results show that the insulation resistance of polymeric insulation decreases when it was exposed to polluted condition such as saline solution no matter of any level of salinity, flour dust, animal feed dust or cement dust. When the duration of ageing is prolonged, the insulation resistance trends to be reduced. Moreover, the insulation resistance of polymeric insulator under 50 °C atmospheric is slightly lower than that of 30 °C.*

*It is also found that hydrophobic properties of polymeric insulation under various salinity, i.e. small salinity, medium salinity and high salinity are still relatively remain its properties while hydrophobic properties under flour dust is partially maintain except the area covered with flour dust. However, hydrophobic properties will be lost when it exposed with feed dust and cement dust.*

## Keywords:

*Ageing, hydrophobic, polluted insulator*

## 1. INTRODUCTION

The polymeric insulators are found in many countries in distribution system especially polluted condition such as industrial area where there are many factories generate polluted dust, e.g. cement plant, flour mill etc. In Thailand, they have been using in some areas to solve the problem of flashover which are easily cause to porcelain insulators. Since it is the early stage of using of polymeric insulators and its characteristic needs to be studied to verify whether it is suitable for use or not. The purpose of this paper is to stud properties of insulator such as ageing,

hydrophobic under industrial dust pollution generated from factories. As it is known, polymeric insulator has main advantage on its hydrophobic properties which can reduce the path of current leakage, in other words, reduce flashover.

## 2. SAMPLES AND AGEING PROCESS

Thirty six specimens from polymeric insulator were prepared for each case, there are six cases for ageing studied : saline solution with three salinity : small salinity, medium salinity and high salinity respectively ( artificial polluted condition ) ; flour dust, animal feed dust and cement dust collected from factories. ( natural pollution ) The pollution process for all specimens for ageing study are carried out by gradually flowing on all specimens with prepared solutions in each case and then let it naturally dry. After that separate each case into two group, one group to be kept at 30 °C while the other group kept at 50 °C The duration of specimens to be under temperature control lasted 8 hours a day and this experiment took place for fifteen days. The insulation resistance of all specimens are measured after completion of temperature control of each day.

To prepare specimens under polluted conditions is referred Solid Layer Method from IEC 507 Standard as guidance. The medium contamination is considered for this experiment. During ageing process, Scanned Electron Microscope ( SEM ) is also used to monitor insulator surface under various polluted condition before and after the process.

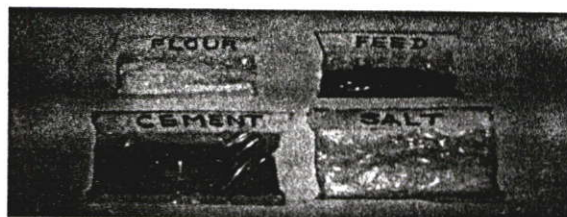


Fig. 1. Samples of Pollution Dusts

### 3. SAMPLES AND HYDROPHOBIC VERIFICATION PROCESS

The pollution process for hydrophobic study can be carried out by preparing twelve specimens from polymeric insulator, then gradually flowing on all specimens with prepared solution ( saline solutions with small salinity, medium salinity and high salinity and solutions with flour dust, animal feed dust and cement dust respectively ) two specimens for each type of solutions, let them naturally dry and then sprayed water all over the surface of all specimens to verify hydrophobic property. After that, separated into two group, one to be kept at 30 ° C while the other kept at 50 ° C. The duration of specimens to be under temperature control lasted 8 hours a day and this experiment took place for fifteen days. After the fifteenth day, all specimens were sprayed with water to verify hydrophobic and compared with the first day.

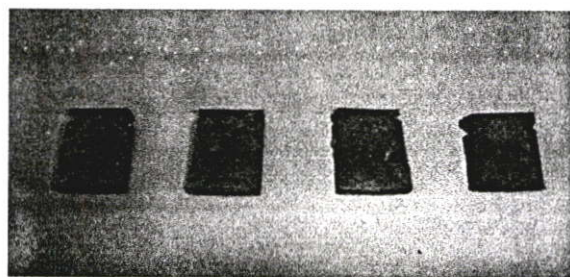


Fig.2 Specimens for Ageing Study After Pollution Process with Animal Feed Dust

Type of Pollutions	SDD ( mg / cm <sup>2</sup> )	Remark
Saline solution	0.028	Small salinity
Saline solution	0.102	Medium salinity
Saline solution	0.25	High salinity
Flour	0.041	
Feed	0.662	
Cement	0.106	

Table 1 Data of Various Polluted Dust and Saline Solutions

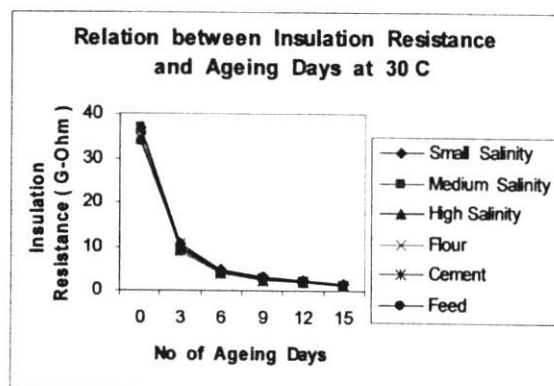
### 4. TEST RESULTS AND ANALYSIS

From Fig 3 ( a ) and ( b ), it is found that the insulation resistance of polymeric insulation significantly decreases in the first three days when it was exposed to polluted condition such as saline solution no matter of any level of salinity,

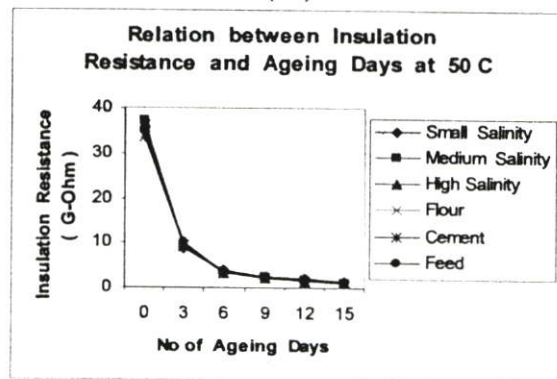
flour dust, animal feed dust or cement dust. When the duration of ageing is prolonged, the insulation resistance tends to be reduced. In addition, From Fig. 4, the insulation resistance of polymeric insulator at 50 ° C is slightly lower than that of 30 ° C. for flour and animal feed dust.

From Fig. 5 and Fig. 6, it is shown the insulator surfaces when monitored by SEM of various kind of salinity and polluted dust at 30 ° C and 50 ° C on 15<sup>th</sup> day compared with the first day. It is found that the polluted insulation surfaces on the first day and on 15<sup>th</sup> day as well as the polluted insulation surfaces at 30 ° C and 50 ° C on 15<sup>th</sup> day are not changed.

Moreover, from Fig. 7, it is obvious that hydrophobic property of polymeric insulation under various salinity, i.e. small salinity, medium salinity and high salinity are still relatively remain its property while hydrophobic property under flour dust is partially maintain except the area covered with flour dust. However, hydrophobic property will be totally lost when it exposed with feed dust and cement dust.

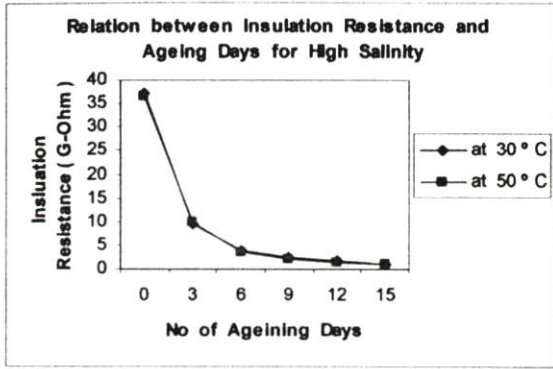


( a )

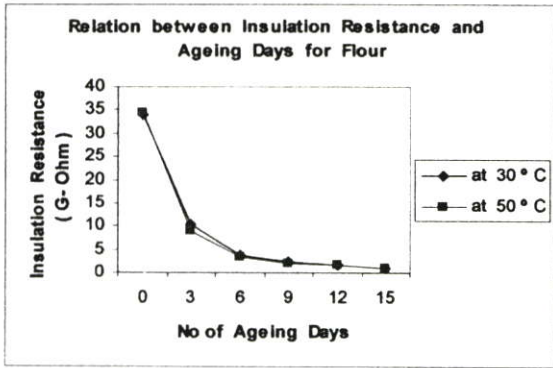


( b )

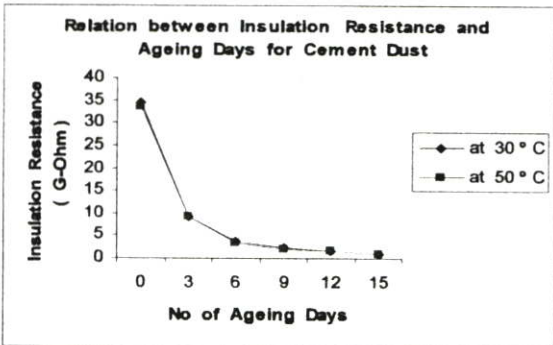
Fig. 3 Relation between insulation resistance and ageing duration when under various pollutions at temperature control ( a ) 30 ° C ( b ) 50 ° C



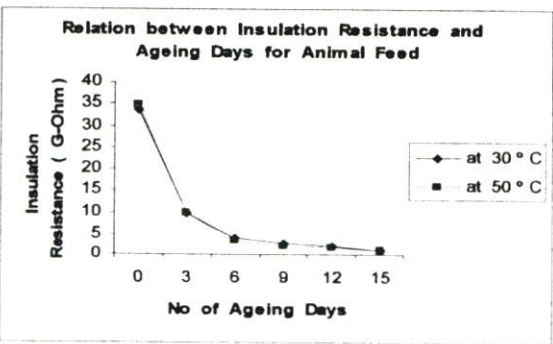
( a ) High Salinity



( b ) Flour Dust

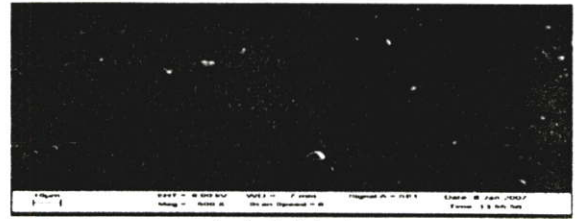


( c ) Cement Dust



( d ) Animal Feed Dust

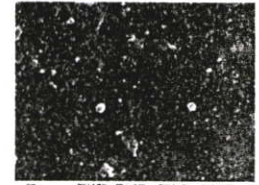
Fig. 4 Relation between Insulation Resistance and Ageing Days of Various Kinds of Dust at 30 and 50 °C Atmospheric



( a ) Original



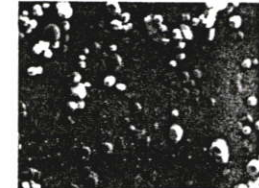
( b ) Small Salinity



( c ) Medium Salinity



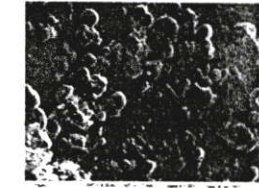
( d ) High Salinity



( e ) Flour

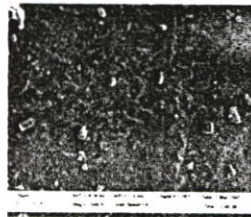


( f ) Feed

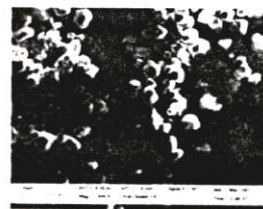
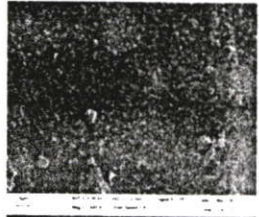


( g ) Animal Feed

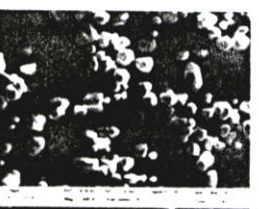
Fig. 5 Illustration of Polymeric Insulator Surface of Various Pollutions on the first day with Magnification of 500 X

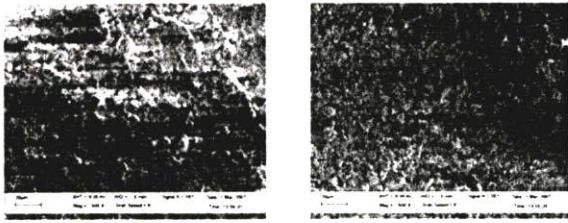


( d ) High Salinity

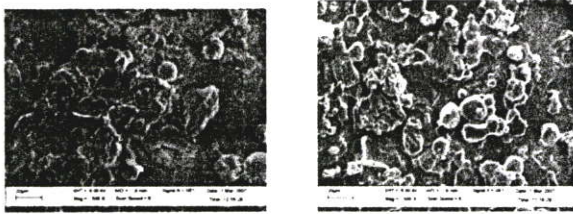


( e ) Flour



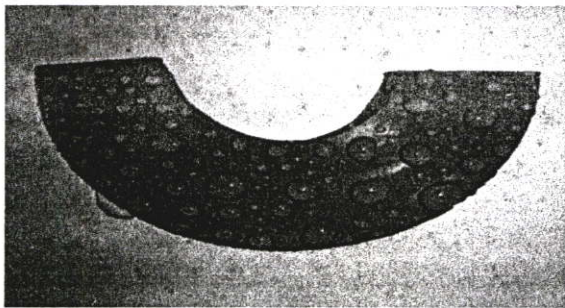


( f ) Cement

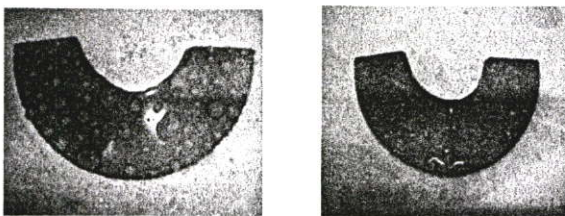


( g ) Animal Feed

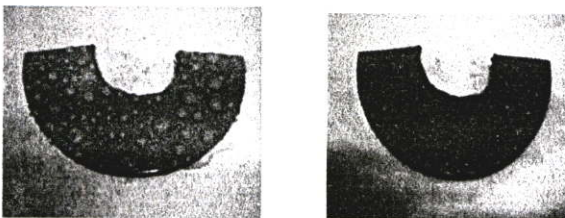
Fig.6 Comparison of Polymeric Insulator Surface at 30 and 50 C after 15<sup>th</sup> day of Various Pollutions with Magnification of 500 X



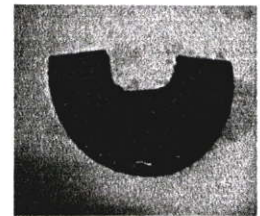
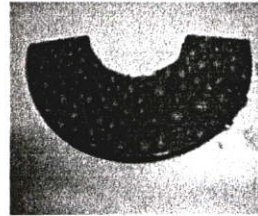
( a ) Original ( HC1)



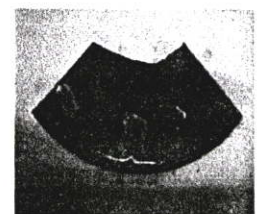
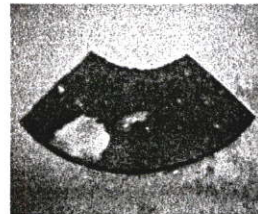
( b ) Small Salinity ( HC2)



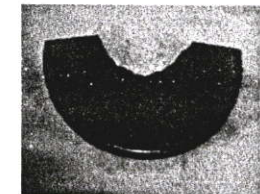
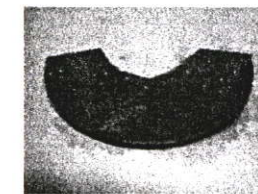
( c ) Medium Salinity ( HC2)



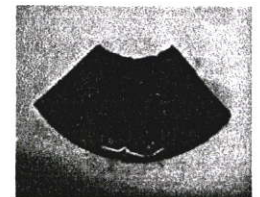
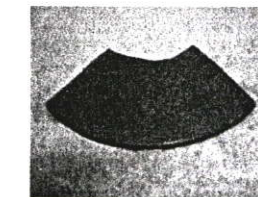
( d ) High Salinity ( HC2)



( e ) Flour ( HC 4)



( f ) Cement ( HC 6)



( g ) Animal Feed ( HC 6)

Fig.7 Comparison between Hydrophobic Property of Specimens under Various Kinds of Polluted Dust on 15<sup>th</sup> day and the first day and Compared with Hydrophobic Classification Guideline ( Appendix )

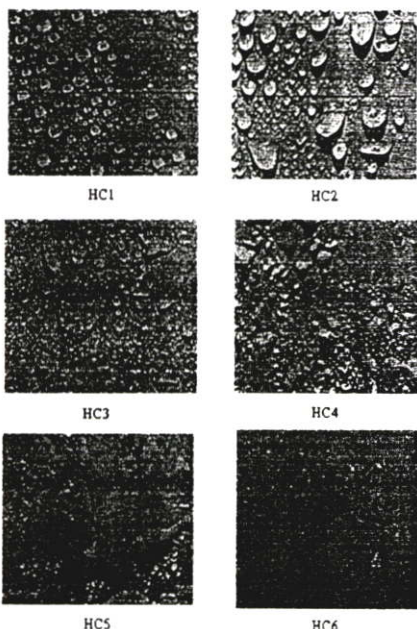
5. CONCLUSION

When polymeric insulator is under pollution condition, its insulation resistance will be gradually decreased, in such condition, it has the opportunity to cause flashover to insulator.

Due to hydrophobic property of polymeric insulator still relatively maintain when it is under saline solution and it is partially remain for flour dust except the area that is covered with flour dust. The hydrophobic properties of polymeric insulator will be lost when it is under animal feed dust and cement dust. Polymeric insulator is

suitable to use for coastal environment while it is unsuitable to use under polluted condition such as animal feed factory, flour factory including cement plant.

#### APPENDIX: Hydrophobic Classification Guideline



[4] D.DEVENDRANATH, PRADEEP M. NIRUGUDE G. V. RAO R. S. SHIVAKUMARA, ARADHYA ARADHYA A.P. SUDHEER, N. S. MOHAN RAO, CHANNAKESHAHA, Investigations on Rain Fog Pollution Test, *IEE High Voltage Engineering Symposium*, 22 - 27 August 1999, Conference Publication, No. 467 @IEE, 1999, pp. 4.111.S25-4.114.S25

[5] WANG SHAOWU, LIANG XIDONG, HUANG LENG CENG, Laboratory Study on Hydrophobicity and Pollution Flashover Properties of Polymer Insulators, *1999 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 723-726

[6] AMORNCHAI CAR, Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage between HVAC and HVDC Insulator, *IPEC2005*, Singapore Nov. 2005

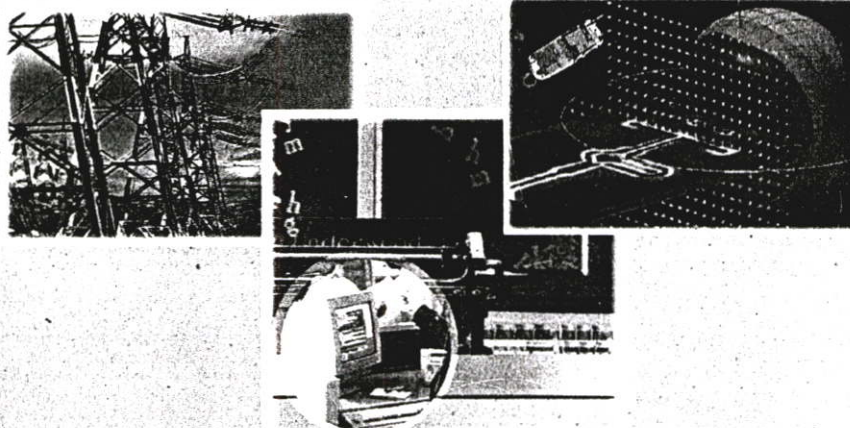
#### Acknowledgements

The author would like to express thankfulness to Provincial Electricity Authority (PEA), Department of Chemistry, Faculty of Science and High Voltage Laboratory, KMITL for concerned instrument and equipment.

#### References

- [1] CHRIS S. ENGELBRECHT, RALF HARTINGS, SENIOR MEMBER IEEE, HELENA TUNELL, BJORN ENGSTROM, HARALD JANSSEN AND RAIMUND HENNINGS, Pollution Tests For Coastal Conditions on an 800-kV Composite Bushing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No 3, July 2003, pp. 953 - 959.
- [2] X. WANG, S. YOSHIMURA, Contamination Performances of Silicone Rubber Subjected to Acid Rain, *IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 5 No 6, December 1998, p. 909-916
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) PUBL. 507, Artificial Pollution Tests on High - Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems, Second Edition, 1991-4.

**VOLUME I**



# **ECTI-CON 2007**

*Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand  
May 9-12, 2007*

## **VOLUME 1**

- *Circuits and Systems*
- *Control Engineering*
- *Electrical Power Engineering*
- *Other Related Fields*



**ECTI**  
Association

**IEEE**  
THAILAND SECTION

**NECTEC**  
a member of NSTDA

**WD** Western  
Digital



TPM1-6-5 2:20 PM	<b>The Adaptive P&amp;O Algorithm with a Hysteretic Current-mode Converter for a Solar-powered Battery Charger</b> Noppadol Khachintung <sup>1</sup> , Phaophak Sirisuk <sup>2</sup> <sup>1</sup> <i>Department of Control and Instrumentation Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand</i> <sup>2</sup> <i>Department of Computer Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand</i>	333
TPM1-6-6 2:40 PM	<b>Proposal for Simple Repetitive Controllers</b> Kou Yamada, Hiroshi Takenaga, Yusuke Saitou, Keiji Satoh <i>Department of Mechanical System Engineering, Gunma University, Kiryu, Gunma Japan</i>	337
3:20 PM - 5:00 PM	<b>Session TPM2-4 High Voltage Engineering 2</b> Chairperson : Kittipong Tanmitr, Khon Kaen University	<b>Thursday,10 May 2007</b>
TPM2-4-1 3:20 PM	<b>Dielectric Investigation of Fresh Fruits</b> K. Tonmitr, A. Kaewrawang, S. Swatdiponphallop, A. Suksri, A. Siritaratiwat, P.Bursri <i>Department of Electrical Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand</i>	341
TPM2-4-2 3:40 PM	<b>Construction of A 100 kV Capacitive Voltage Divider</b> J.Sarasook, S. Chotigo, B.Puengsiri <i>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand</i>	345
TPM2-4-3 4:00 PM	<b>The Hydrophobic of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution and A Comparison with Artificial Pollution</b> Apisit Chaisaengsukkul, Norasage Pattanadech, Siriwat Potivejkul <i>Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand</i>	349
TPM2-4-4 4:20 PM	<b>A Comparison of Corona Inception Phenomena between Porcelain and Polymeric Insulators under Dust Pollution in Thailand</b> Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech <i>Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand</i>	353
TPM2-4-5 4:40 PM	<b>Modulation Circuit for VLF Transformer</b> S. Chotigo, S. Seesanga <i>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand</i>	357
3:20 PM - 5:00 PM	<b>Session TPM2-6 Power Electronics 3</b> Chairperson : Itsada Boonyaroonate, King Mongkut's University of Technology Thonburi	<b>Thursday,10 May 2007</b>
TPM2-6-1 3:20 PM	<b>The Challenges of Near-Future EMC Facility</b> Vichate Ungvichian <i>EMI Lab., Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida</i>	361

# The Hydrophobic of Polymeric Insulator under Dust Pollution and A Comparison with Artificial Pollution

Apisit Chaisaengsukkul\*\*, Norasage Pattanadech, Siriwat Potivejkul  
 Electrical Engineering Dept., Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, 10520 Thailand ; E-mail : apisit@cpf.co.th, norasage@yahoo.com

**Abstract-** This paper presents results of properties of polymeric insulation study, e.g. hydrophobic, ageing which operate influence the electrical characteristic of polymeric insulator etc. when they are subjected by artificial polluted condition compared with natural pollution in Thailand.

The test results show that hydrophobic property of polymeric insulator under various salinities, i.e. small salinity, medium salinity and high salinity are still relatively remain its property while hydrophobic property under flour dust is partially maintain except the area covered with flour dust. However, hydrophobic property will be lost when it exposed with feed dust and cement dust. It is also found that the insulation resistance of polymeric insulator decreases when it was exposed to polluted condition such as saline solution no matter of any level of salinity, flour dust, animal feed dust or cement dust. When the duration of ageing is prolonged, the insulation resistance trends to be reduced. In addition, the insulation resistance of polymeric insulator under 50 °C atmospheric is slightly lower than that of 30 °C.

**Keywords:** Hydrophobic, polymeric insulator, dust pollution

## I. INTRODUCTION

The polymeric insulators are found in many countries in distribution system especially polluted condition such as industrial area where there are many factories generate polluted dust, e.g. cement plant, flour mill etc. In Thailand, they have been used in some areas to solve the problem of flashover which are easily cause to porcelain insulators. Since it is the early stage of using of polymeric insulators and its characteristic needs to be studied to verify whether it is suitable for use or not. The purpose of this paper is to study properties of polymeric insulator such as hydrophobic, ageing under industrial dust pollution generated from factories. As it is known, polymeric insulator has main advantage on its hydrophobic property which can reduce the path of current leakage, in other words, reduce flashover.

## II. SAMPLES AND PROCESS OF HYDROPHOBIC VERIFICATION

\*\* The author would like to express thankfulness to Provincial Electricity Authority (PEA); Department of Chemistry, Faculty of Science and High Voltage Engineering Laboratory, Faculty of Engineering, KMITL for their kind support of relevant instrument and equipment.

The pollution process for hydrophobic study can be carried out by preparing twelve specimens from polymeric insulator, then gradually flowing on all specimens with prepared solutions ( saline solutions with small salinity, medium salinity and high salinity and solutions with flour dust, animal feed dust and cement dust respectively ) two specimens for each type of solutions, let them naturally dry and then sprayed water all over the surface of all specimens to verify hydrophobic property. After that, separated into two group, one to be kept at 30 °C while the other kept at 50 °C. The duration of these specimens under temperature control lasted 8 hour a day and took for five days. After the fifth day, all specimens were sprayed with water to verify hydrophobic and compare with the first day.



Fig. 1. Samples of pollution dusts ( from left to right : flour, animal feed and cement dust )

## III. SAMPLES AND AGEING PROCESS

For ageing study, thirty six specimens from polymeric insulator were prepared, six specimens for each case, there are six cases to be studied : saline solutions ( artificial polluted condition ) with three salinities : small salinity, medium salinity and high salinity respectively; flour dust, animal feed dust and cement dust collected from factories ( natural pollution ). The pollution process for all specimens for ageing study are the same as for hydrophobic study. The specimens for ageing are separated into two group, one group is kept at 30 °C while the other group kept at 50 °C. The duration of specimens to be under temperature

control lasted 8 hours a day and this experiment took place for five days. The insulation resistance of all specimens are measured after completion of temperature control of each day.

To prepare specimens under polluted conditions is referred Solid Layer Method from IEC 507 Standard.

During ageing process, Scanned Electron Microscope (SEM) is also used to monitor insulator surface under various polluted conditions.

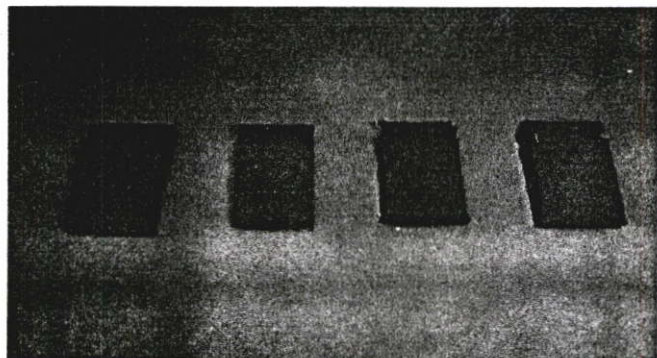


Fig.2. Specimens for ageing study after pollution process with cement dust

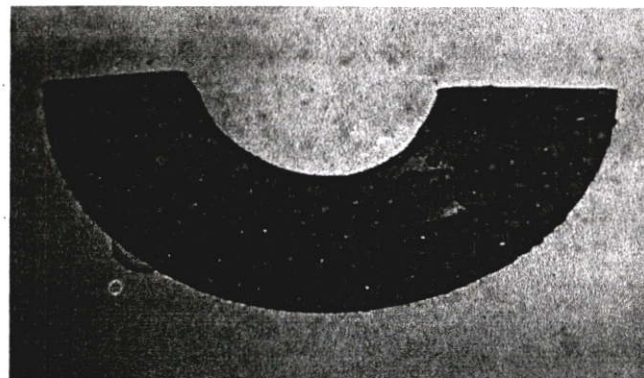
TABLE 1  
DATA OF VARIOUS POLLUTED DUST AND SALINE SOLUTIONS

Type of pollution	ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	Remark
Saline solutions	0.028	small salinity
Saline solutions	0.102	medium salinity
Saline solutions	0.250	high salinity
Flour	0.041	
Feed	0.662	
Cement	0.106	

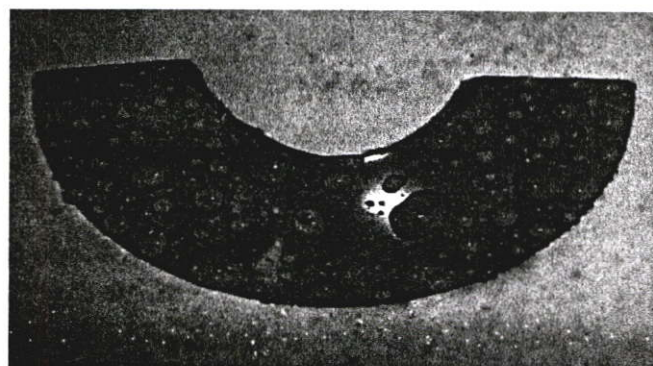
#### IV. TEST RESULTS

From the test results in Fig 3 (a) to (g), it is obvious that hydrophobic property of polymeric insulator under various salinities, i.e. small salinity, medium salinity and high salinity are still relatively remain its property while hydrophobic property under flour dust is partially maintain except the area covered with flour dust. However, hydrophobic property will be totally lost when it exposed with feed dust and cement dust.

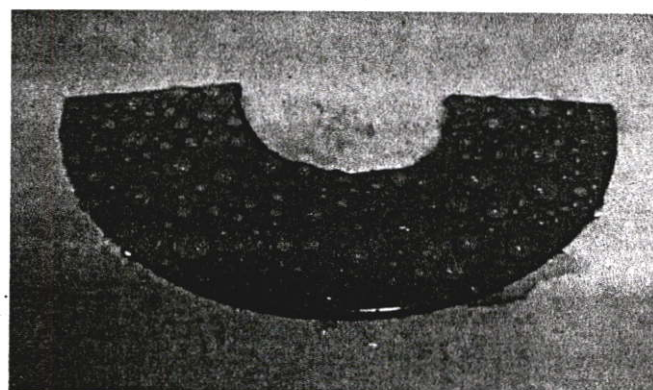
In addition, from Fig 4 (a) and (b) it is found that the insulation resistance of polymeric insulator decreases when it was exposed to polluted condition such as saline solutions no matter of any level of salinity, flour dust, animal feed dust or cement dust. When the duration of ageing is prolonged, the insulation resistance tends to be reduced. In addition, the insulation resistance of polymeric insulator at  $50^\circ\text{C}$  is slightly lower than that of  $30^\circ\text{C}$ .



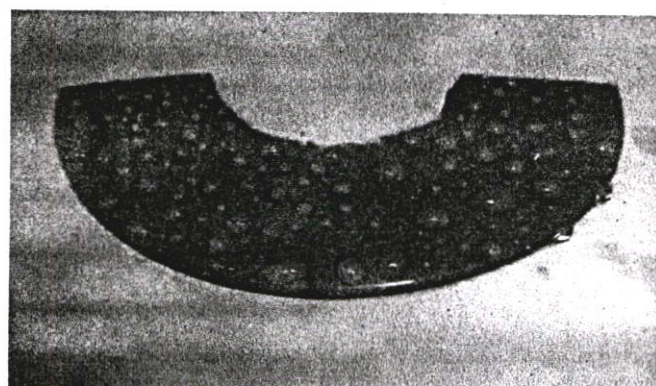
( a ) Original ( HC 1 )



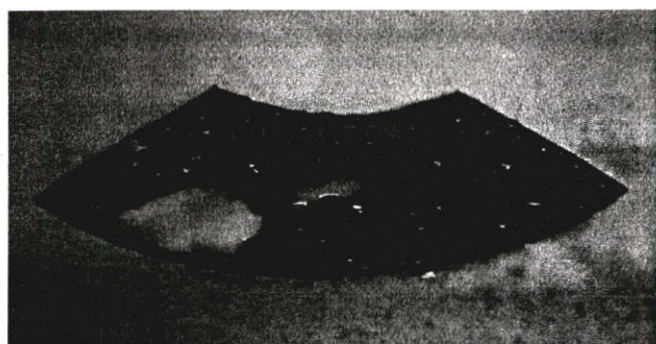
( b ) Small salinity ( HC 2 )



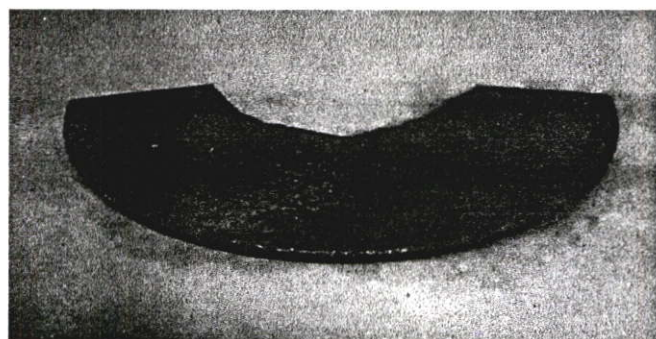
( c ) Medium salinity ( HC 2 )



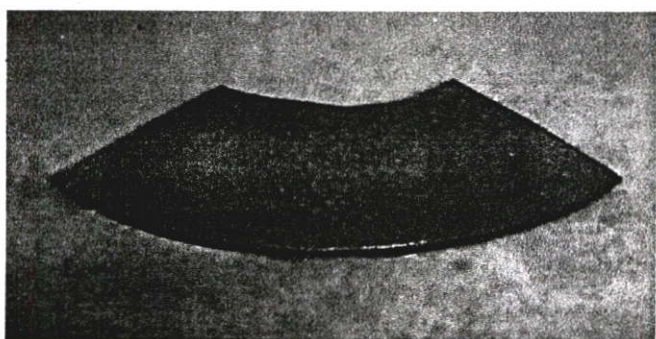
( d ) High salinity ( HC 2 )



( e ) Flour ( HC4 )

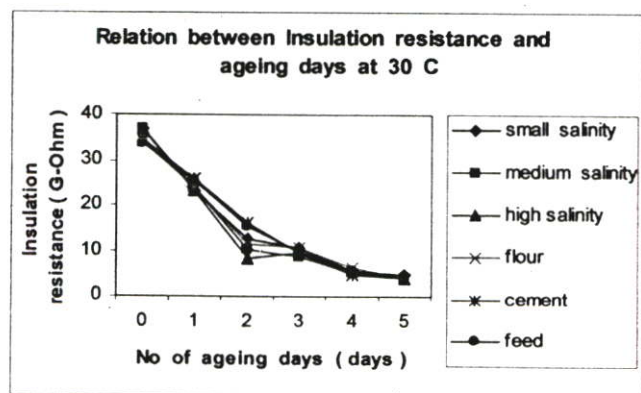


( f ) Cement ( HC 6 )

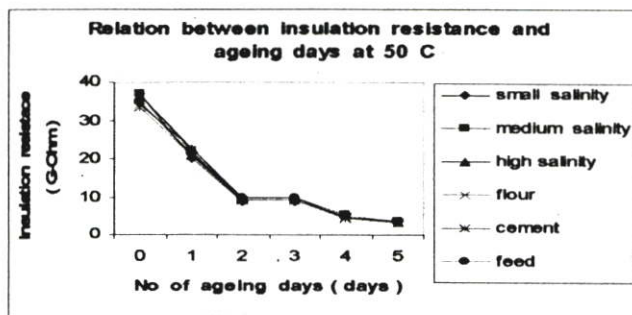


( g ) Animal feed ( HC 6 )

Fig. 3. Hydrophobic property of specimens under various kinds of polluted dust and compared with Hydrophobic Classification Guideline ( see Appendix )

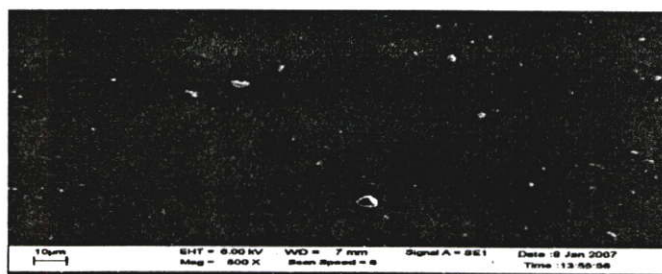


( a )

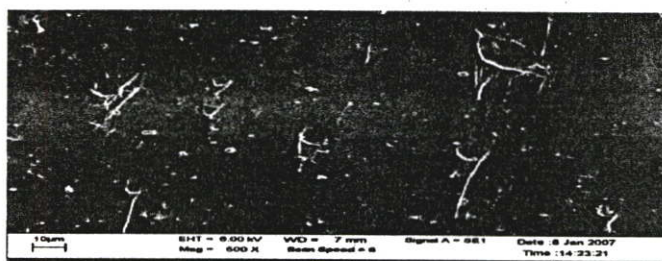


( b )

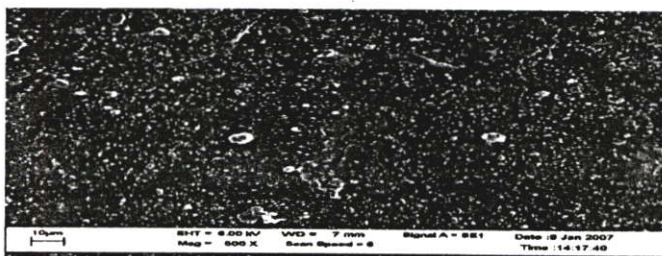
Fig. 4. Relation between insulation resistance and ageing duration when under temperature control ( a ) 30 C ( b ) 50 C



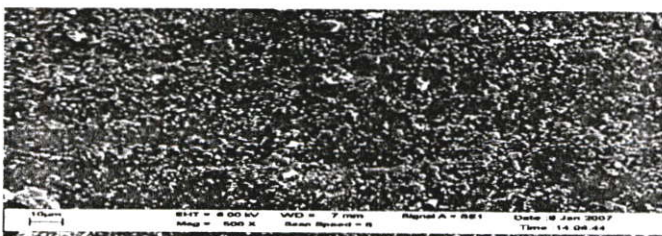
( a ) Original



( b ) Small salinity



( c ) Medium Salinity



( d ) High salinity

## ACKNOWLEDGMENT

The author would like to express thankfulness to Provincial Electricity Authority (PEA); Department of Chemistry, Faculty of Science and High Voltage Laboratory, Faculty of Engineering, KMITL for their kind support of relevant instrument and equipment.

## REFERENCES

- [1] Chris S. Engelbrecht, Ralf Hartings, Senior Member IEEE, Helena Tunell, Bjorn Engstrom, Harald Janssen and Raimund Hennings, "Pollution Tests for Coastal Conditions on an 800 - kV Composite Bushing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No 3, July 2003, pp. 953 - 959.
- [2] Xingliang Jiang, Jianlin Hu, Yu Liang, Lichun Shu, Shujiao Xie, "Pollution Flashover Performance of Short Sample for 750 kV Composite Insulators", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, September 19-22, 2004, pp. 312-315
- [3] IEC. Publ. 507, "Artificial Pollution Tests on High - Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems", Second Edition, 1991-4
- [4] D. Devendranath, Pradeep M. Nirgude, G.V. Rao R. S. Shivakumara Aradhya, A.P. Sudheer, N.S. Mohan Rao, Channakeshava, "Investigations on Rain Fog Pollution Test", IEEE High Voltage Engineering Symposium, 22 - 27 August 1999, Conference Publication No. 467 @IEE, 1999, pp. 4.111.S25-4.114.S25
- [5] X Wang, S.Yoshimura, "Contamination Performances of Silicone Rubber Subjected to Acid Rain", IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation, Voilme 5 No 6, December 1998, p. 909-916

## APPENDIX

## Hydrophobic Classification Guideline

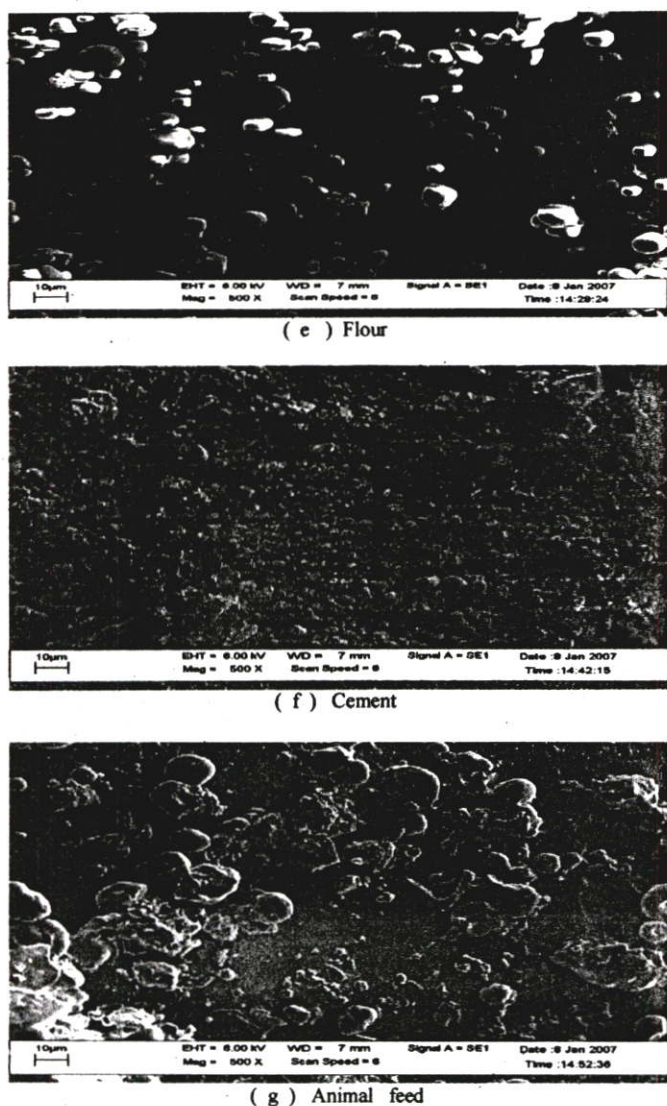
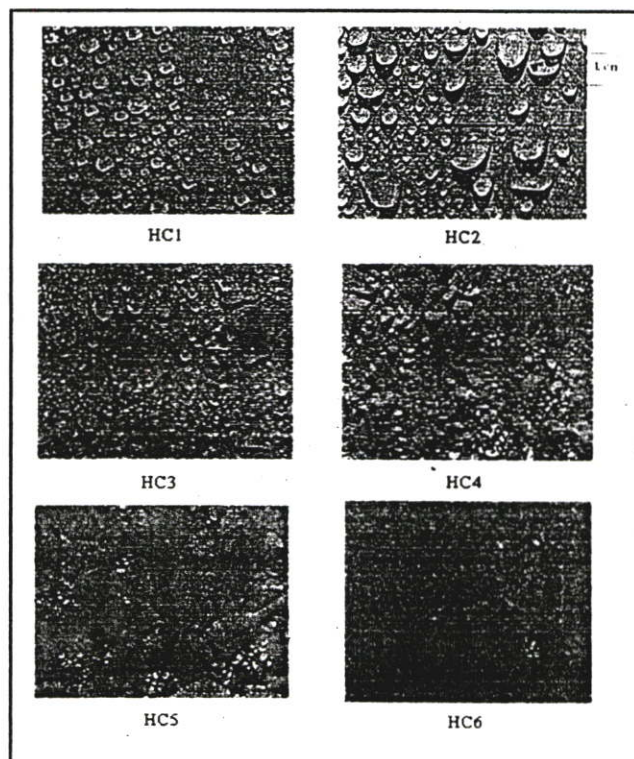


Fig. 5. Illustration of polymeric insulator surface of various Pollutions with magnification of 500 X

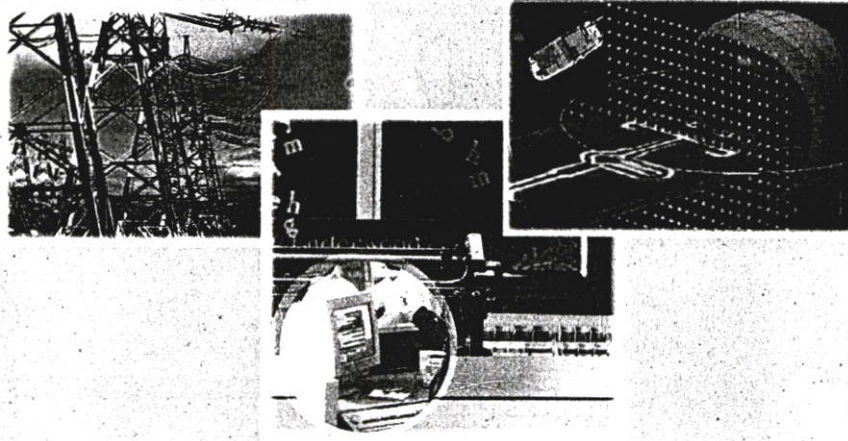
## V. CONCLUSIONS

Since hydrophobic property of polymeric insulator still relatively maintain when it is under saline solutions and it is partially remain for flour dust except the area that is covered with flour dust. The hydrophobic property of polymeric insulator will be lost when it is under cement dust and animal feed dust. Polymeric insulator is suitable to use for coastal environment while it is unsuitable to use under polluted condition such as cement plant, animal feed factory including flour factory.

When polymeric insulator is under polluted condition, its insulation resistance will be gradually decreased, in such condition, it has the chance to cause flashover to insulator.



VOLUME I

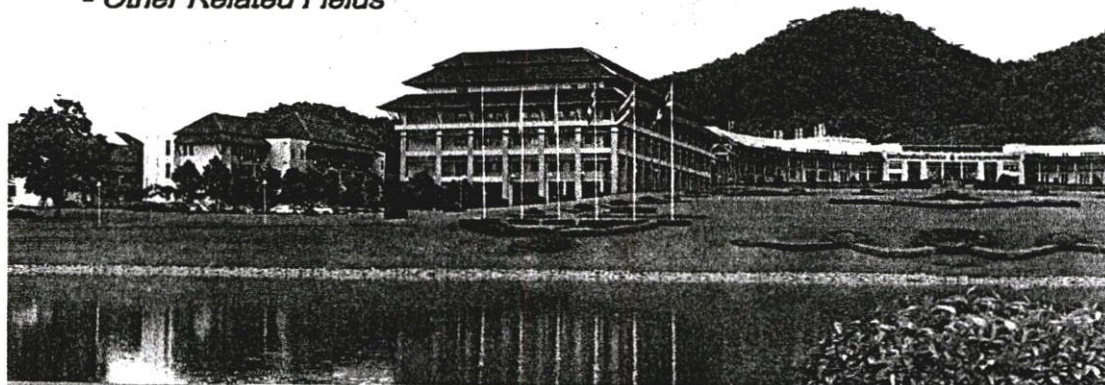


# ECTI-CON 2007

*Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand  
May 9-12, 2007*

## VOLUME 1

- Circuits and Systems
- Control Engineering
- Electrical Power Engineering
- Other Related Fields



**ECTI**  
Association

**IEEE**  
THAILAND SECTION

**NECTEC**  
a member of NSTDA

**WD** Western  
Digital



TPM1-6-5 2:20 PM	<b>The Adaptive P&amp;O Algorithm with a Hysteretic Current-mode Converter for a Solar-powered Battery Charger</b> Noppadol Khaehintung <sup>1</sup> , Phaophak Sirisuk <sup>2</sup> <sup>1</sup> <i>Department of Control and Instrumentation Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand</i> <sup>2</sup> <i>Department of Computer Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand</i>	333
TPM1-6-6 2:40 PM	<b>Proposal for Simple Repetitive Controllers</b> Kou Yamada, Hiroshi Takenaga, Yusuke Saitou, Keiji Satoh <i>Department of Mechanical System Engineering, Gunma University, Kiryu, Gunma Japan</i>	337
3:20 PM - 5:00 PM	<b>Session TPM2-4</b> <b>High Voltage Engineering 2</b> Chairperson : Kittipong Tanmitr, Khon Kaen University	<b>Thursday,10 May 2007</b>
TPM2-4-1 3:20 PM	<b>Dielectric Investigation of Fresh Fruits</b> K. Tonmitr, A. Kaewrawang, S. Swatdiponphallop, A. Suksri, A. Siritaratiwat, P.Bursri <i>Department of Electrical Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand</i>	341
TPM2-4-2 3:40 PM	<b>Construction of A 100 kV Capacitive Voltage Divider</b> J.Sarasook, S. Chotigo, B.Puengsiri <i>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand</i>	345
TPM2-4-3 4:00 PM	<b>The Hydrophobic of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution and A Comparison with Artificial Pollution</b> Apisit Chaisaengsukkul, Norasage Pattanadech, Siriwat Potivejkul <i>Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand</i>	349
TPM2-4-4 4:20 PM	<b>A Comparison of Corona Inception Phenomena between Porcelain and Polymeric Insulators under Dust Pollution in Thailand</b> Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech <i>Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand</i>	353
TPM2-4-5 4:40 PM	<b>Modulation Circuit for VLF Transformer</b> S. Chotigo, S. Seesanga <i>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand</i>	357
3:20 PM - 5:00 PM	<b>Session TPM2-6</b> <b>Power Electronics 3</b> Chairperson : Itsada Boonyaroonate, King Mongkut's University of Technology Thonburi	<b>Thursday,10 May 2007</b>
TPM2-6-1 3:20 PM	<b>The Challenges of Near-Future EMC Facility</b> Vichate Ungvichian <i>EMI Lab., Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida</i>	361

# A Comparison of Corona Inception Phenomena between Porcelain and Polymeric Insulators under Dust Pollution in Thailand

Apisit Chaisaengsukkul\*\*, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech  
Electrical Engineering Dept., Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, 10520 Thailand ; E-mail : apisit@cpf.co.th, Kpsiriwa@kmitl.ac.th

**Abstract-** Porcelain insulators are generally used in distribution system, in some polluted area such as industrial area where there are many factories generated polluted dust, e.g. flour mill, cement plant, animal feed factories etc., polymeric insulators are used to replace porcelain insulators. However, in such polluted condition, it sometimes cause flashover of insulators in power system and as a result, it would impact power system stability. This paper presents results of corona phenomena study on 33 kV system AC insulators under industrially polluted dust, e.g. flour dust, cement dust and animal feed dust collected from factories and compared with kaolin which is artificial pollution.

The results show that corona inception voltage of porcelain insulators under flour dust, kaolin, feed dust and cement dust are relatively constant when tested pollution levels are increased and corona inception voltage of flour dust and cement dust are higher than that of kaolin and animal feed dust with the increasing of pollution levels.

The corona inception voltage of polymeric insulators under kaolin and feed dust conditions decrease when tested pollution levels are increased while corona inception voltage of polymeric insulator under flour dust and cement dust conditions are relatively constant with the increasing of tested pollution levels.

In addition, corona inception voltage of polymeric insulators under industrial dust, i.e. kaolin, flour dust, animal feed dust and cement dust are higher than that of porcelain insulators.

The leakage current of porcelain insulators under animal feed dust increase when tested pollution levels are increased while leakage current of porcelain insulators under kaolin, flour and cement dust as well as polymeric insulator under various kinds of dust are relatively constant with the increasing of tested pollution levels.

**Keywords:** polymeric insulator, dust pollution, corona

## I. INTRODUCTION

In electrical system particularly distribution system, porcelain insulators are generally used. In some polluted area such as industrial area where there are many factories produced polluted dust, e.g. flour mill, cement plant,

\*\* The author would like to express thankfulness to Data Entry Co.,Ltd, Faculty of Science, KMITL including relevant factories for supporting of equipment and polluted dust.

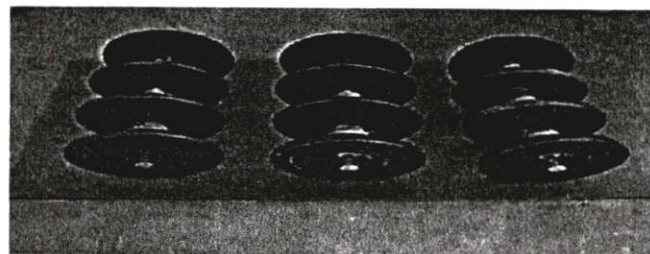
animal feed factories etc., polymeric insulators are widely used to replace porcelain insulators in many countries. However, in such polluted condition, it sometimes cause flashover of insulators in power system and as a result, it would cause power interruption in power system and on the other hands, impact to power system stability.

## II. SOLID LAYER METHOD

The simulation of industrial polluted condition can be referred IEC507 standard, this standard recommends Solid Layer Method to verify the insulator being suitable to use under polluted condition. Three porcelain insulators and three polymeric insulators with alternating sheds were provided to carry out the test.

### A. Solid Layer Chamber

Solid layer chamber is fabricated as according to standard requirements. The dimension of chamber is width x length x height = 4.2 x 4.2 x 4.5 m<sup>3</sup> Electric steam generator produces steam from ground level to upwards direction with the rate of approximately 50 g / hr / m<sup>3</sup> The object test is suspended approximately 2.0 m above ground.



(a) Polluted porcelain insulators



(b) Polluted polymeric insulators

Fig. 1. Test objects

### B. Solid Layer Preparation

The preparation of solid layer can be done by providing 40 g. Kaolin and 3 g. salt. Then dissolve in the container with 1000 g. water, stir together and fill in jet spray. Spray test objects ( porcelain and polymeric insulators ) with this solution and let it dry. After test objects naturally dry, carefully collect suspended dust from test objects by using wet brush and dissolve suspended dust in the known quantity water in another container, stir for approximately 2 minutes and then measure its conductivity with conductivity meter and record. The ESDD ( Equivalent Salt Deposit Density ) can be determined by referring IEC 507 standard. After first ESDD is obtained, the other values of ESDD can be obtained by the procedure mentioned above with appropriate amount of salt as according to tested pollution levels, i.e. 13 and 60 g. etc. The consideration of ESDD in this study focus on three pollution levels, i.e. small contamination, medium contamination and high contamination respectively.

The solid layer including ESDD for other kinds of dust, i.e. flour dust, cement and feed dust can be obtained by repeating steps mentioned in previous paragraph.

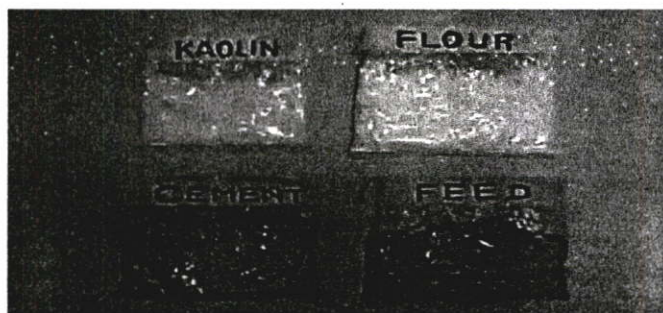


Fig. 2 Samples of dust ( upper : Kaolin, flour ; lower : cement and feed )

TABLE I  
ESDD OF VARIOUS KINDS OF DUST

Pollution level s	ESDD ( mg / cm <sup>2</sup> )			
	Kaolin	Flour	Feed	Cement
Low	0.033	0.045	0.034	0.037
Medium	0.057	0.13	0.037	0.056
High	0.13	0.36	0.193	0.20

### III. TEST PROCEDURE

The test arrangement for solid layer method was set up as shown in Fig. 3. After all equipment including test object ( porcelain insulator ) with low pollution level of kaolin are set up, the test begins. Test voltage is gradually applied to test object until 19 kV ( phase voltage ) and then maintain, after that open valve to let steam from steam generator slowly distributes from

ground level and flow in upward direction and detect corona phenomena by corona camera. In case no corona occurred, gradually increase voltage level and still detect corona phenomena, the maximum voltage is limited not exceed 55 kV. Then the second specimen of porcelain insulator is taken place. After three specimens of porcelain insulator with low pollution level are tested. The consequential test of three polymeric insulators with low pollution level are carried out. After completion of test for low pollution level of both porcelain and polymeric insulators. Then, porcelain and polymeric insulators with medium pollution level and high pollution level are then provided for the test.

The test is carried out with the same test procedure mentioned above for flour dust, animal feed dust and cement dust respectively. During each test, leakage current is measured and recorded at all applied voltage when corona phenomena occurred. Leakage current can be measured by current transformer with ration 1:40 and signal is transmitted to digital oscilloscope.

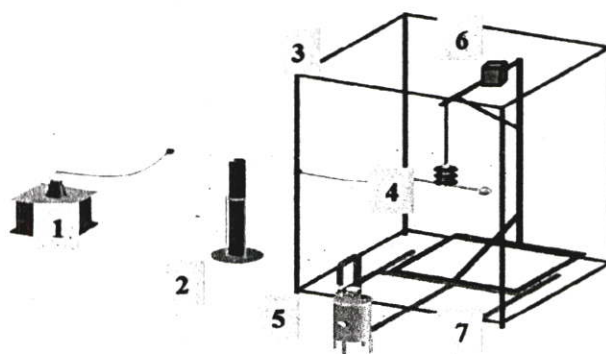


Fig 3 Test arrangement

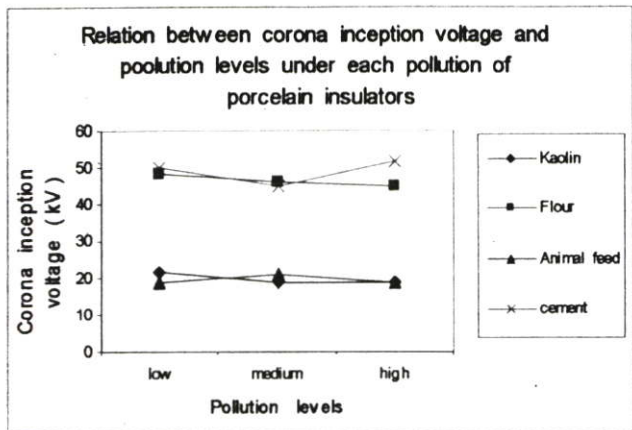
Where

1. Testing transformer rated 5 kVA, 100 kV
2. Water resistance
3. Test chamber dimension  $W \times L \times H = 4.2 \times 4.2 \times 4.5 \text{ m}^3$
4. Test object ( porcelain and polymer )
5. Steam generator
6. Current transformer ratio 1:40
7. Steam distributor

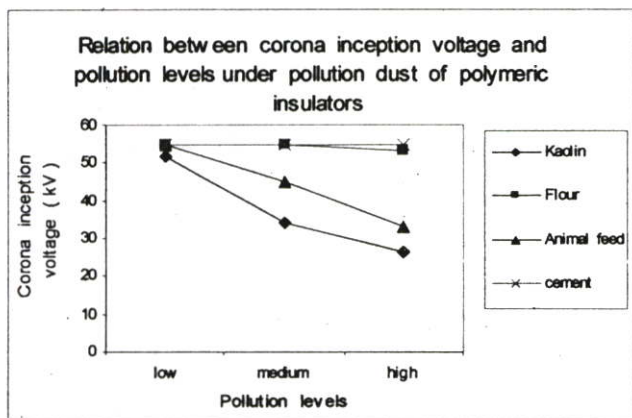
### IV. TEST RESULTS

From Fig. 4 ( a ) for porcelain insulator, corona inception voltage of flour dust, kaolin, feed dust and cement are relatively constant when tested pollution levels are increased and corona inception voltage of flour dust and cement dust are higher than that of kaolin and animal feed dust with the increasing of pollution levels.

From Fig. 4 ( b ) for polymeric insulator, corona inception voltage of kaolin and animal feed dust decrease when tested pollution levels are increased while corona inception voltage of flour dust and cement dust are relatively constant with the increasing of tested pollution levels.



( a )



( b )

Fig. 4 Relation between corona inception voltage and pollution levels of each pollution for ( a ) porcelain insulators and ( b ) polymeric insulators

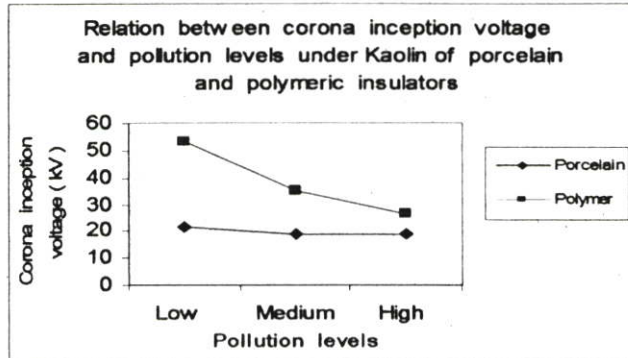
From Fig. 5 ( a ), for Kaolin , corona inception voltage of porcelain insulators are relatively constant when tested pollution levels are increased while corona inception voltage of polymeric insulators decrease with the increasing of tested pollution levels.

From Fig. 5 ( b ), for flour dust, corona inception voltage of porcelain insulators and polymeric insulators are relatively constant when tested pollution levels are increased.

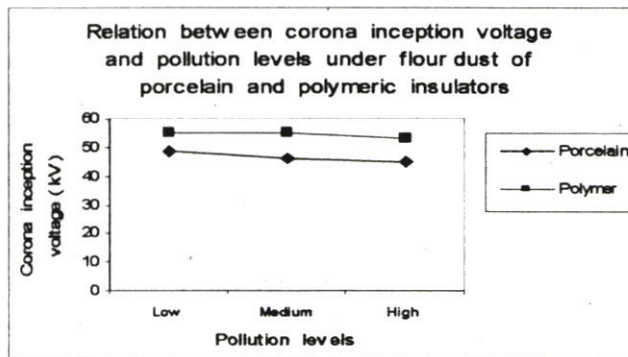
From Fig. 5 ( c ), for animal feed dust , corona inception voltage of porcelain insulators are relatively constant when tested pollution levels are increased while corona inception voltage of polymeric insulators decrease with the increasing of tested pollution levels.

From Fig. 5 ( d ), for cement dust , corona inception voltage of porcelain insulators as well as polymeric insulators are relatively constant when tested pollution levels are increased.

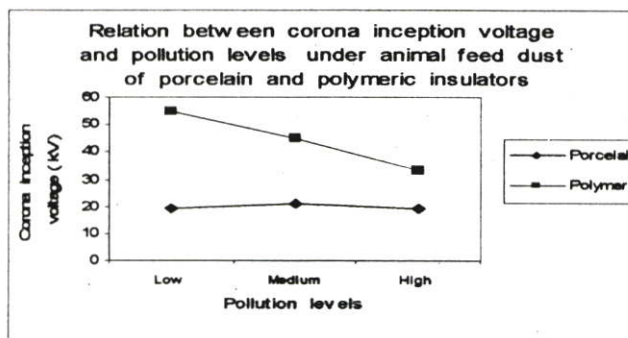
From Fig 5 ( a ) to ( d ), corona inception voltage of polymeric insulators are higher than that of porcelain insulators.



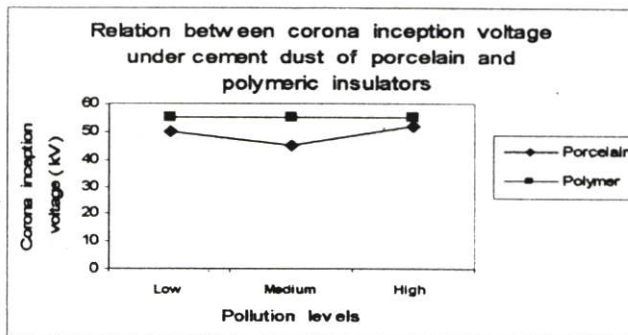
( a ) Kaolin



( b ) Flour



( c ) Animal feed



( d ) Cement

Fig. 5. Relation between corona inception voltage and various kind of dust for porcelain and polymeric insulators

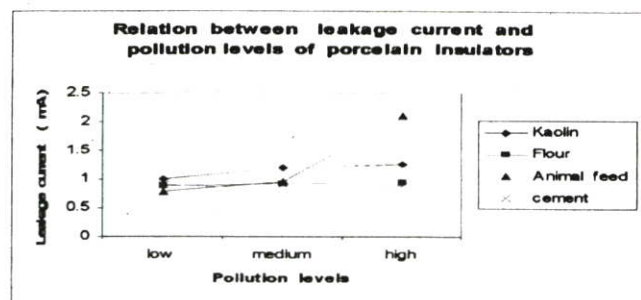
## V. CONCLUSIONS

The corona inception voltage of porcelain insulators under flour dust, kaolin, feed dust and cement are relatively constant when tested pollution levels are increased and corona inception voltage of flour dust and cement dust are higher than that of kaolin and animal feed dust with the increasing of pollution levels.

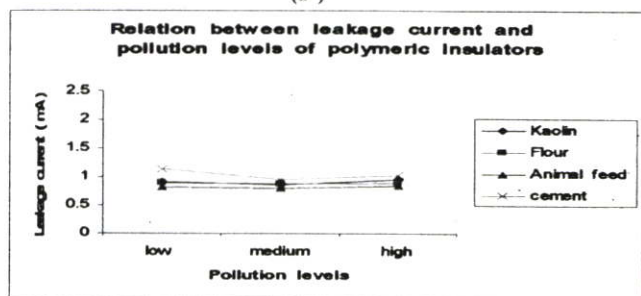
The corona inception voltage of polymeric insulators under kaolin and feed dust conditions decrease when tested pollution levels are increased while corona inception voltage of polymeric insulator under flour dust and cement dust conditions are relatively constant with the increasing of tested pollution levels.

In addition, corona inception voltage of polymeric insulators under industrial dust, i.e. kaolin, flour dust, animal feed dust and cement dust are higher than that of porcelain insulators.

The leakage current of porcelain insulators under animal feed dust increase when tested pollution levels are increased while leakage current of porcelain insulators under kaolin, flour and cement dust as well as polymeric insulator under various kinds of dust are relatively constant with the increasing of tested pollution levels.



(a)



(b)

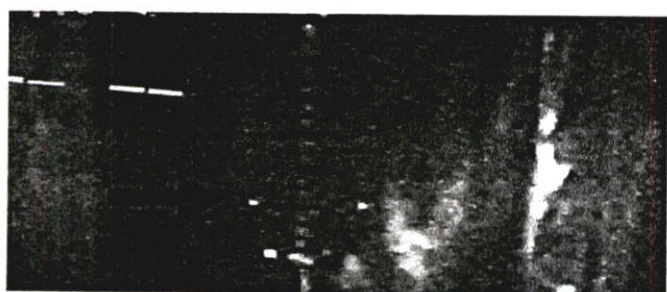
Fig 6 Relation between leakage current and pollution levels of various kind of dust of (a) porcelain insulators and (b) polymeric insulators

From Fig 6 (a), for porcelain insulator, leakage current of animal feed dust increases when tested pollution levels are increased while leakage current of kaolin, flour and cement dust are relatively constant with the increasing of tested pollution levels.

From Fig 6 (b), for polymeric insulator, leakage current of all various kinds of dust are relatively constant when tested pollution levels are increased.



(a)



(b)

Fig 7 Corona phenomena of (a) porcelain insulator and (b) polymeric insulator under animal feed dust detected by corona camera (arrow sign indicates corona occurring point)

## ACKNOWLEDGMENT

The author would like to express thankfulness to Data Entry Co., Ltd; Department of Chemistry, Faculty of Science and High Voltage laboratory, Faculty of Engineering, KMITL including relevant factories for their kind support of concerned test equipment and various polluted dust.

## REFERENCES

- [1] Stephen A. Sebo, Edgar P. Casale, Jose R. Cedeno, Wibawa Tjokrodiponto and Sheikh A. Akbar, "Review of Features of Fog Chamber at The Ohio State University for Polymer Insulator Evaluation", IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 20 - 23, 1996, pp. 443-446
- [2] Chris S. Engelbrecht, Ralf Hartings, Senior Member IEEE, Helena Tunell, Bjorn Engstrom, Harald Janssen and Raimund Hennings, "Pollution Tests for Coastal Conditions on an 800 - kV Composite Bushing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No 3, July 2003, pp. 953 - 959.
- [3] Xingliang Jiang, Jianlin Hu, Yu Liang, Lichun Shu, Shujiao Xie, "Pollution Flashover Performance of Short Sample for 750 kV Composite Insulators", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, September 19-22, 2004, pp. 312-315
- [4] IEC Publ. 507, "Artificial Pollution Tests on High - Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems", Second Edition, 1991-4
- [5] Wibawa Tjokrodiponto, Stephen A. Sebo, John D. Sakich, Tiebin Zhao, "Simultaneous Electrical and Visual Measurements of Leakage Currents Along Polymer Insulators in Artificial Pollution Tests", IEEE Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 25 - 30, 1997, Seoul, Korea, pp. 738- 741.

## ประวัติผู้เขียน

นายอภิสิทธิ์ ไชยแสงสุขกุล จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ( เกียรตินิยม ) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เข้าศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในสถาบันเดียวกัน มีความสนใจสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ระบบไฟฟ้ากำลัง